

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Technologie soustružení se zpětným posuvem

Turning Technology with Reverse Feed

Student: Jan Pavlas

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Pavlas**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Technologie soustružení se zpětným posuvem**
Turning Technology with Reverse Feed

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Současný stav technologie soustružení zpětným posuvem.
2. Analýza a rozbor nového návrhu.
3. Kontrola a měření parametrů VBD.
4. Návrh, příprava a provedení experimentu.
5. Vyhodnocení zkoušek a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.

HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



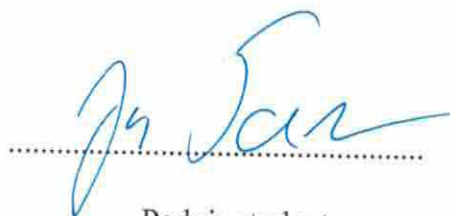

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje od Sandvik Coromant CZ s.r.o., Praha, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 2. května 2019.

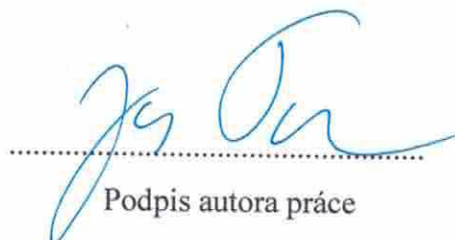


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 2. května 2019.



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Pavlas

Adresa trvalého pobytu autora práce: Krumvíř 364, 691 73 Krumvíř

Anotace

PAVLAS, Jan. *Technologie soustružení se zpětným posuvem*. Ostrava, 2019, 65 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Jana Petrů.

Diplomová práce je analýzou výsledné řezné síly, jejích složek, drsnosti obrobené plochy, mechanismu opotřebení VBD, technologie soustružení se zpětným posuvem. V první části práce je seznámení s danou technologií a použitými přístroji, nástroji v experimentu. Druhá část byla zaměřená na experimentální činnost, kdy byly obráběny dva materiály 1.1191, 1.4404, pomocí dvou VBD s označením *CP-B1108-M5 2025* a *CP-B1108-L4 1115*. Na základě dat byl určen mechanismus opotřebení VBD a zvolené nejvhodnější řezné parametry pro jednotlivé materiály. V poslední řadě je v diplomové práci doporučení možného dalšího vývoje a výzkumu této technologie.

Klíčová slova: soustružení, soustružení se zpětným posuvem, řezná síla, CoroTurn Prime, stranové zpětné – SBW, čelní zpětné – EBW, stranové dopředné – SFW, čelní dopředné – EFW.

PAVLAS, Jan. *Turning Technology with Reverse Feed*. Ostrava, 2019, 65 s. Master Thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology. Thesis head Jana Petrů.

The diploma thesis deals with an analysis of the resulting cutting force, its components, roughness of the machined surface, the wear mechanism of turning technology inserts with reverse feed. There is an introduction to given technology and used instruments, tools in experiment in the first part of the thesis. The second part was focused on experimental work, when two materials 1.1191, 1.4404 were machined by two inserts with the designation *CP-B1108-M5 2025* and *CP-B1108-L4 1115*. Based on the data, the wear mechanism of the inserts was determined and the most suitable cutting parameters for the individual materials were set. Last but not least, the diploma thesis recommends possible further development and research of this technology.

Key words: turning, turning with reverse feed, cutting force, CoroTurn Prime, side backward – SBW, end backward – EBW, side forward – SFW, end forward – EFW.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval své vedoucí diplomové práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D. za poskytnutí odborných, cenných rad, připomínek a pomoci při zhotovení této práce. Poděkování také patří panu Jiřímu Rajnochovi obchodnímu zástupci firmy Sandvik Coromant pro oblast Ostravy.

Obsah

Úvod.....	11
1. Soustružení se zpětným chodem	12
1.1 Řešená problematika.....	12
1.2 Specifika zpětného soustružení	12
1.3 Vhodnost použití zpětného soustružení	13
1.4 Nástroje pro technologii zpětného soustružení.....	14
1.5 Geometrie VBD pro zpětné soustružení	18
1.6 Tvorba, obvod a velikost třísky	20
1.7 Dosavadní poznatky společnosti Sandvick Coromant.....	21
2. Příprava a pomůcky využitě během experimentální činnosti.....	22
2.1 Obráběný materiál – 1.1191	24
2.2 Obráběný materiál – 1.4404	24
2.3 Obráběcí stroj a procesní médium	25
2.4 Použité řezné nástroje	27
2.4.1 Vyměnitelná břitová destička.....	27
2.4.2 Držák pro vyměnitelnou břitovou destičku typu B	28
2.5 Měřicí zařízení řezných sil – dynamometr	29
2.6 Zařízení ke snímkování VBD	31
2.7 Zařízení k měření drsnosti obrobené plochy	31
3. Postup, průběh experimentální části.....	32
4. Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje	36
4.1 Mechanismus opotřebení VBD CP-B1108-M5 2025 při soustružení s použitím procesního media při obrábění materiálu 1.1191	36
4.2 Mechanismus a opotřebení VBD při soustružení bez přítomnosti procesního média na materiálech 1.1191 a 1.4404.....	41
5. Vyhodnocení řezných sil při soustružení se zpětným posuvem.....	48
5.1 Algoritmus pro vyhodnocující dat:.....	49

5.2	Změřené hodnoty na materiálu 1.1191 při soustružení se zpětným posuvem bez procesního média.....	51
5.2.1	Charakteristické třísky soustružení mat. 1.1191	54
5.3	Naměřené hodnoty na materiálu 1.4404 při soustružení se zpětným posuvem bez procesního média.....	55
5.3.1	Charakteristické třísky soustružení mat. 1.1191	59
6.	Závěr.....	60
7.	Použitá literatura	61
8.	Seznam příloh.....	64

Seznam použitých značek, zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
A	[%]	tažnost
CVD	-	Chemical Vapor Deposition (chemické napařování z plynné fáze)
E	[GPa]	modul pružnosti v tlaku
EBW	-	čelní zpětné soustružení
EFW	-	čelní podélné soustružení
Fc	[N]	řezná složka výsledné síly obrábění
Ff	[N]	posuvová složka výsledné řezné síly obrábění
Fp	[N]	pasivní složka výsledné řezné síly obrábění
Fv	[N]	výsledná řezná síla
G	[GPa]	modul pružnosti ve smyku
HC	-	základní materiál VBD
M	-	třída materiálu dle ČSN ISO 513
Me	-	medián síly
P	-	třída materiálu dle ČSN ISO 513
Puž	[W]	užitkový výkon
PVD	-	Physical Vapor Deposition (fyzikální napařování z plynné fáze)
R	[N]	řezný odpor
Ra	[μm]	průměrná aritmetická odchylka profilu
RE	[mm]	poloměr špičky VBD
Rm	[MPa]	mez pevnosti
Rp0,2	[MPa]	mez kluzu
Rz	[μm]	maximální odchylka profilu
S		třída materiálu dle ČSN ISO 513
SBW	-	podélné zpětné soustružení
SFW	-	podélné dopředné soustružení
VB max.	[mm]	maximální opotřebení na hřbetu
VBD	-	vyměnitelná břitová destička
ap	[mm]	hloubka řezu
ap dop.	[mm]	hloubka řezu doporučená
ap max.	[mm]	hloubka řezu maximální
ap min.	[mm]	hloubka řezu minimální

f	[mm]	posuv
f _n	[mm]	posuv na otáčku
f _n dop	[mm]	posuv na otáčku doporučený
f _n max.	[mm]	posuv na otáčku maximální
f _n min.	[mm]	posuv na otáčku minimální
vc	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
α _r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
δ	[%]	průměrná relativní chyba
Δ	-	rozdíl aritmetické průměrné síly a mediánu síly
Index		
max	-	maximální hodnota
min	-	minimální hodnota

Úvod

Výroba součástí z kovových materiálů pomocí technologie obrábění je jednou s nejrozšířenějších metod vyhotovení součástí. Současné výrobní procesy, jejich vývoj neustále posouvají hranice této technologie, kdy je kladen především důraz na efektivitu výroby. Související trvanlivost nástroje, jeho řezivost a snižování časů obrábění, pomocných úkonů během řezného procesu, například výměna nástroje. Jednou z možných cest k dosažení vyšší produktivity je vývoj řezných nástrojů, jenž umožňuje vznik novým technologiím obrábění. Soustružení se zpětným posuvem je jedním z nových přístupů obrábění.

Charakteristická odlišnost soustružení se zpětným posuvem od soustružení konvenčního lpí ve směru posuvu nástroje, vůči čelu obrobku u podélného obrábění, vůči válcovité ploše při obrábění čela a v náběhu nástroje do obrobku. U soustružení se zpětným posuvem válcovitých ploch je nástroj vtlačen do obráběného materiálu do požadované hloubky radiálním pohybem, následně koná pohyb vně obrobku rychlostí rovnou posuvu v axiálním směru. Obrábění čelních ploch zpětným soustružením probíhá obdobně. Nástroj je vtlačován v axiálním směru a posuv nástroje je v radiálním směru na obrobek. U konvenčního soustružení nástroj odebírá třísku od konce obrobku, nedochází tedy k vtlačování nástroje do obrobku.

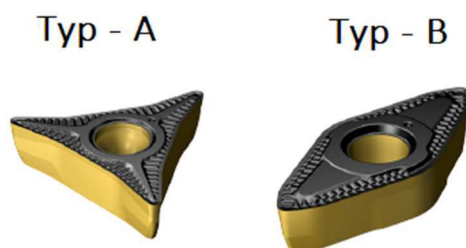
Použití metody obrábění se zpětným posuvem přislíbují vyšší konkurenceschopnost díky zvýšení produktivity při výrobě. U této nové technologie se očekává až 50 % nárůst produktivity. Dále flexibilita metody umožňuje soustružit obrobek ve všech směrech a tím pádem umožňuje snížení počtu potřebných řezných nástrojů a jejich časté výměny k obrábění různých ploch obrobku. U soustružení se zpětným posuvem se také očekává větší trvanlivost vyměnitelných břitových destiček. Vyšší řezné a posuvové rychlosti zajišťují vyšší rychlost odběru obráběného materiálu. Celkové zrychlení a zefektivnění procesu vede ke zkrácení strojního času, vyšší využití strojního času a menšího počtu výměn nástrojů. Má za následek zvýšení efektivity a produktivity. Dále přispívá tedy k rychlejší návratnosti investic, celkovému snížení nákladů na jednotku výrobku.

1. Soustružení se zpětným chodem

1.1 Řešená problematika

Jedná se o inovativní technologii soustružení, kterou představila společnost Sandvick Coromant zhruba před 4 lety. Byla vyvinuta nová geometrie vyměnitelných břitových destiček k soustružení se zpětným posuvem a označená jako Prime Turning™. Z důvodu stárí této technologie nebyly v dostupné literatuře, která je k dispozici v univerzitní knihovně, databázích nalezeny podklady k této technologii soustružení. Od této metody výrobce slibuje provádět řezné operace ve všech směrech mnohem efektivněji a produktivněji.

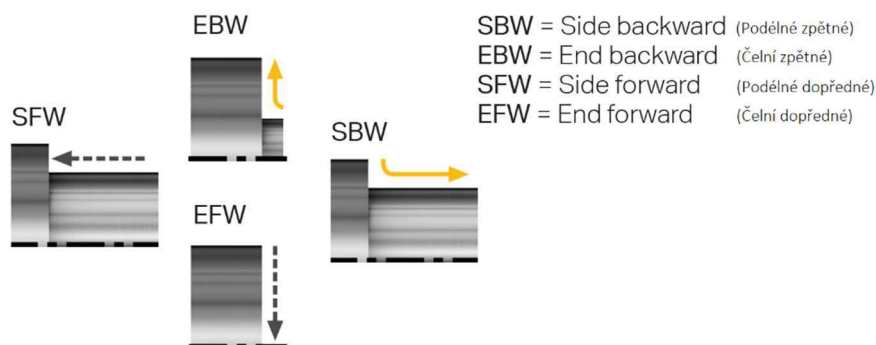
Aktuálně jsou vyvinuty dva typy břitových destiček, A – type a B – type, jak je uvedeno na *obr. 1.1*. Tyto břitové destičky lze použít jak pro konvenční soustružení, tak pro obrábění se zpětným posuvem. [3]



Obr 1.1.: Typy vyměnitelných břitových destiček [21]

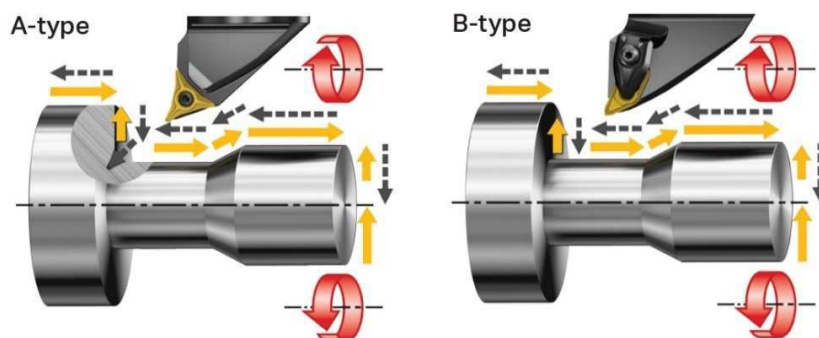
1.2 Specifika zpětného soustružení

Vzhledem k technologii soustružení výrobce vyvinul novou terminologii pro jednoznačné určení, flexibilitu a zjednoduší komunikaci v metodě zpětného soustružení. Na obrázku 1.2, lze rozeznat všechny směry obrábění a jejich označení, kdy žlutě zvýrazněné šipky znázorňují primární směry obrábění pro danou technologii.



Obr 1.2.: Označení směrů obrábění metodou CoroTurn Prime [6]

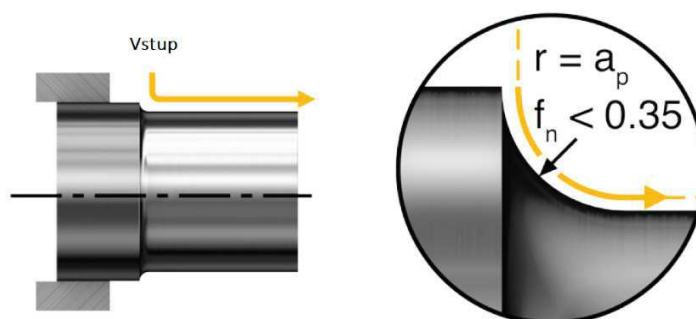
Možnosti tvarového obrábění nástroji CoroTurn Prime od Sandvik Coromant jsou znázorněné na obrázku 1.3 pro jednotlivé typy vyměnitelných břitových destiček.



Obr 1.3.: Možnosti obrábění VBD typy A a B [6]

Při zpětném soustružení musí nástroj vnikat do obráběného materiálu za použití menšího posuvu a po kruhové dráze, z důvodu snazšího vniknutí do povrchu obráběného těles, menšího namáhání špičky vyměnitelné břitové destičky. Ke správnému náběhu nástroje do obrobku a pracovního postupu poskytuje výrobce generátor kódů.

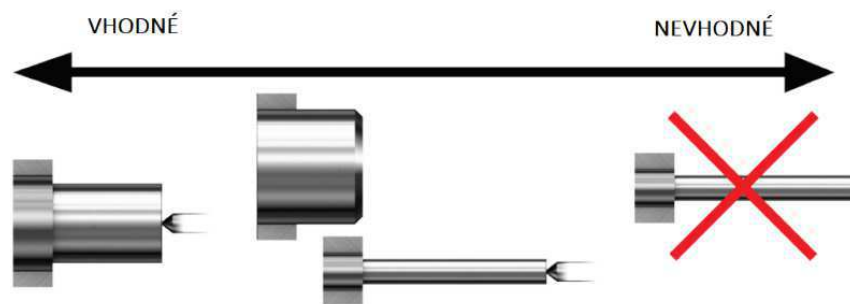
Výrobce doporučuje během celé operace obrábění dodržet konstantní tloušťku třísky. Pro obrábění šikmých ploch výrobce také dodává generátor kódů.



Obr 1.4.: Náběh nástroje do záběru [6]

1.3 Vhodnost použití zpětného soustružení

Zpětné soustružení a k tomu určené nástroje a metody je optimální využít pro krátké kompaktní součásti nebo součásti podepřené pomocí kužele, trnu. Z důvodu lepší stability obrobku při podélném zpětném soustružení dochází k zabránění vytahování obrobku z upínacích čelistí – včetně, sklíčidla. Metoda je vhodná pro hromadnou výrobu nebo pro obrábění, kde je vyžadováno časté seřízení a výměna nástroje. Dále je doporučeno upínat obrobek do sklíčidla, při obrábění zpětným soustružením není vhodné použít čelní unašeč obrobku z důvodu možné ztráty přitlačného tlaku na tomto unašeči.



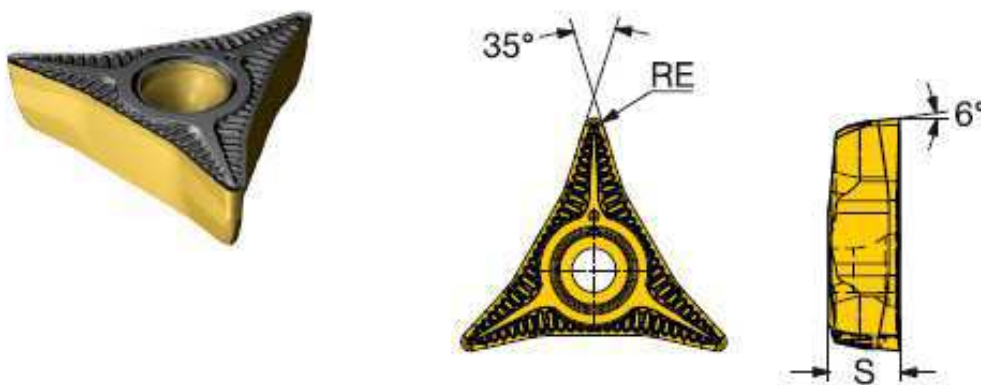
Obr 1.5.: Vhodnost polotovarů k použití zpětného obrábění [6]

1.4 Nástroje pro technologii zpětného soustružení

Firma Sandvik Coromant vyvinula celou řadu nástrojů ke zpětnému soustružení, které jsou modulárním systémem. Hlavním parametrem volby řezného nástroje je typ vyměnitelné břitové destičky, kdy je na výběr ze dvou variant (A, B). Dle plánované operace, možnosti upnutí řezného nástroje a typu destičky se volí držák vyměnitelné břitové destičky. Je možno použít stopkového držáku nebo řeznou hlavu CoroTurn Prime, kde držáky mohou mít zabudovanou funkci přívodu procesního média ve svém těle a jsou v provedení ve dvou typech upínání VBD (šroubem nebo upínkou). [21]

a) Břitové destičky typu A

Tato břitová destička má tři řezné břity s úhlem 35° . Výrobce nabízí břitovou destičku ve čtyřech nástrojových třídách (4325, 2025, 1115, H13A) a třech geometriích L3, L5 a L5W. Nástroje typu A jsou určeny pro dokončování, lehké hrubování a tvarové obrábění ve všech směrech. V tabulce 1.1 jsou uvedeny řezné parametry, charakteristický vzhled destičky typu A obrázku 1.6. [21]



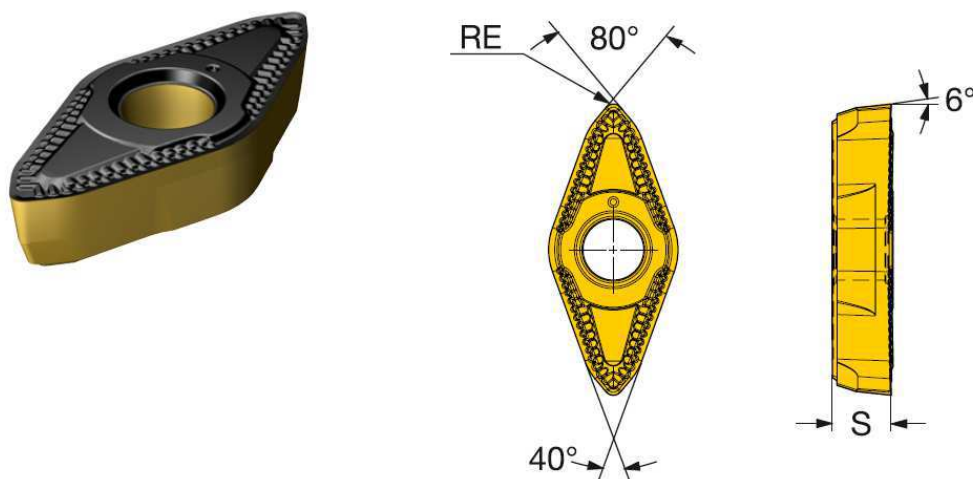
Obr 1.6.: břitová destička typu A [23]

Tab. 1.1.: Doporučené hodnoty řezných parametrů pro typ A VBD [6]

	SBW	EBW	SFW	EFW	
f_n min.	0,20	0,20	0,10	0,10	[mm]
f_n dop.	0,40	0,40	0,20	0,20	[mm]
f_n max.	0,50	0,50	0,25	0,25	[mm]
a_p min.	0,25	0,25	0,25	0,25	[mm]
a_p dop.	1,50	1,50	1,00	1,00	[mm]
a_p max.	3,00	2,50	1,50	1,50	[mm]
χ_r	30	25	115	120	[°]

b) Břítové destičky typu B

Tento typ břítové destičky byl použit v experimentu. Má dva nástrojové břity, vyrábí se ve čtyřech nástrojových třídách 4325, 2025, 1115 a H13A, jež disponují šest variant geometrie břítové vyměnitelné destičky L4, L4W, H3, H3W, M5 a M5W. Výrobce doporučuje tuto destičku využívat při zpětném soustružení s hloubkou řezu a_p do 3 mm a posuvem f do 1,2 mm pro hrubovací operace. [21]



Obr 1.7.: Břítová destička typu B [23]

Tab. 1.2.: Doporučené hodnoty řezných podmínek typu B VBD [6]

	SBW	EBW	SFW	EFW	
f_n min.	0,20	0,20	0,10	0,10	[mm]
f_n dop.	0,40	0,40	0,20	0,20	[mm]
f_n max.	0,50	0,50	0,25	0,25	[mm]
a_p min.	0,25	0,25	0,25	0,25	[mm]
a_p dop.	1,50	1,50	1,00	1,00	[mm]
a_p max.	3,00	2,50	1,50	1,50	[mm]
χ_r	30	25	115	120	[°]

CoroTurn® Prime

Kódové značení břitových destiček



CP	A	11	08	M5	W	4325
1	2	3	4	5	6	7

1 Označení skupiny nástrojů CoroTurn Prime

CP

2 Typ břitové destičky

A = Verze pro lehké a tvarové obrábění
B = Verze pro hrubovací obrábění

3 Velikost břitové destičky, IC

11 = 11 mm

4 Poloměr špičky

04 = 0,4 mm
08 = 0,8 mm

5 Geometrie břitové destičky

L5 = Dokončování
M5 = Střední obrábění

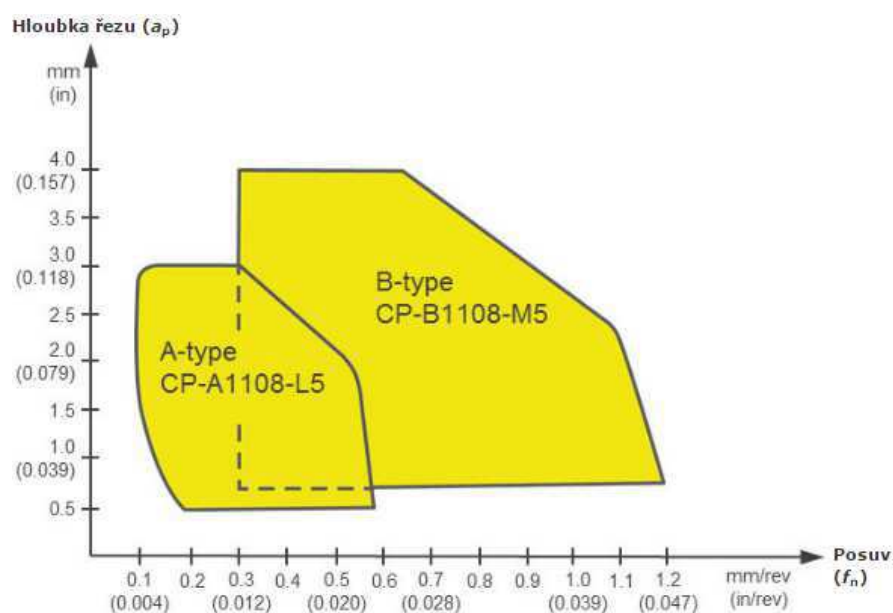
6 W = hladicí geometrie Wiper (je-li k dispozici)

W

7 Nástrojová třída

4325

Obr 1.8.: Kódové označení břitové destičky [23]



Obr 1.9.: Přípustní rozsah hodnot řezných parametrů pro nástroj typu A a B [3]

Řezné podmínky konvenčního obrábění a obrábění zpětným posuvem pomocí vyměnitelné břitové destičky typu A a B, pro jednotlivé oblasti materiálů lze porovnat v tabulkách 1.3 ÷ 1.5. Oblast *P* je určená k obrábění ocelí, oblast *M* znázorňuje obrábění korozivzdorných ocelí a žárupevné slitiny mají oblast *S*. Všechny hodnoty byly převzaty od společnost Sandvick Coromant, jenž představila technologii zpětného soustružení CoroTurn Prime. [12]

Tab. 1.3.: Řezné podmínky pro hrubování [4]

Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [m·min ⁻¹]	330	-	350
	f_n [mm]	0,35	-	1,20
	a_p [mm]	4	-	3
M	v_c [m·min ⁻¹]	200	-	250
	f_n [mm]	0,35	-	1,20
	a_p [mm]	4	-	3
S	v_c [m·min ⁻¹]	60	-	100
	f_n [mm]	0,30	-	0,50
	a_p [mm]	2	-	2,5

Tab. 1.4.: Řezné podmínky pro dokončování [4]

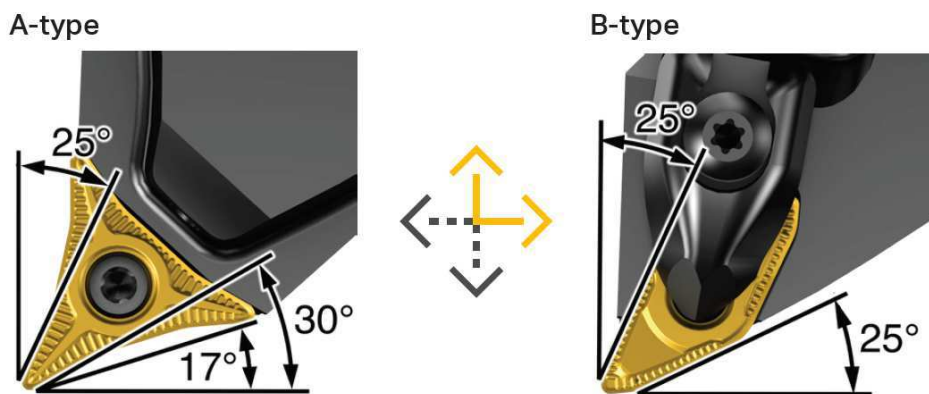
Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [m·min ⁻¹]	300	350	350
	f_n [mm]	0,30	0,40	0,60
	a_p [mm]	2	2	2,5
M	v_c [m·min ⁻¹]	200	250	250
	f_n [mm]	0,30	0,40	0,60
	a_p [mm]	2	2	2,5
S	v_c [m·min ⁻¹]	60	100	100
	f_n [mm]	0,20	0,30	0,40
	a_p [mm]	1,5	1,5	2

Tab. 1.5.: Řezné podmínky pro obrábění čelních ploch [4]

Skupina	Řezné podmínky	Konvenční obrábění	CoroTurn Prime A – type	CoroTurn Prime B – type
P	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	330	350	350
	f_n [mm]	0,35	0,50	1,20
	a_p [mm]	3	2,5	1,5
M	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	200	250	250
	f_n [mm]	0,35	0,50	1,20
	a_p [mm]	3	2,5	1,5
S	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	60	100	100
	f_n [mm]	0,30	0,35	0,50
	a_p [mm]	2	1,5	1,5

1.5 Geometrie VBD pro zpětné soustružení

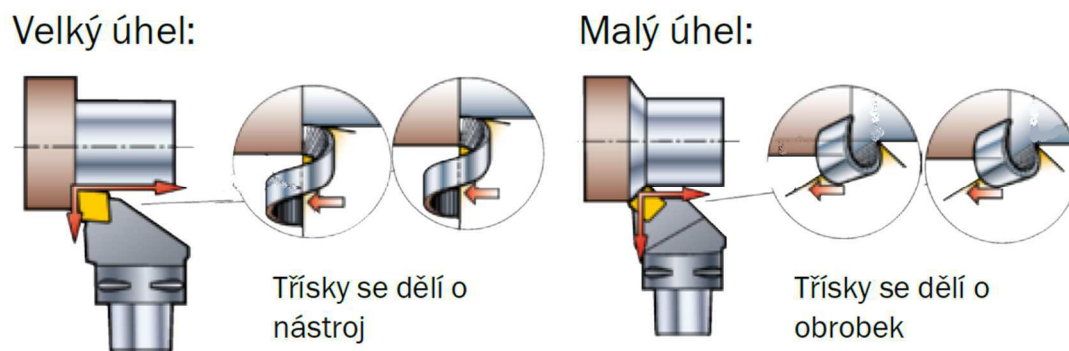
Vyměnitelné břitové destičky ke zpětnému soustružení CoroTurn Prime vynikají úhel nastavení hlavního ostří κ_r 30° a VBD typu B κ_r 25°. Díky utvářečům třísky by měla docházet během procesu obrábění k zalomení či uváznutí třísky.



Obr 1.10.: Znáznornění úhlu nastavení hlavního ostří [21]

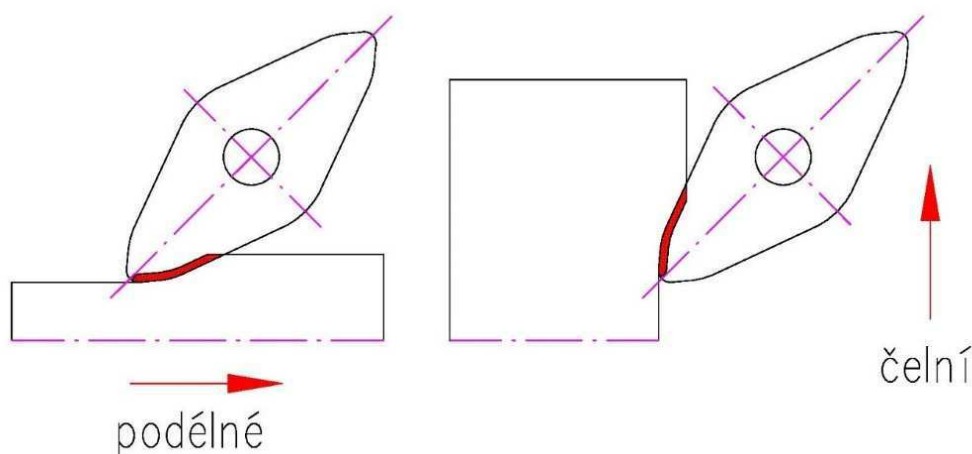
Malý úhel nastavení hlavního ostří způsobuje tvorbu tenčí a širší třísky, což má za následek rozložení mechanického zatížení a tepelného zatížení na větší plochu – hranu nástroje a menší namáhání špičky nástroje. Dále je díky menšímu bodovému namáhání nástroje prodloužená životnost. Lze tedy zvýšit řezné parametry při zachování obvyklé životnosti VBD.

Nastavení úhlu hlavního ostří má velký vliv na rozložení složek řezné síly. Při malém úhlu nastavení hlavního ostří složky řezné síly působí v radiálním i axiálním směru, řezný proces je více náchylný k vibracím, u VBD dochází k menšímu vrubovému opotřebení a břit je méně namáhán při vstupu a výstupu z obrobku. Velký úhel nastavení hlavního ostří způsobuje, že značná část řezné síly působí ve směru posuvné složky síly, tedy proti vřetenu. [20]



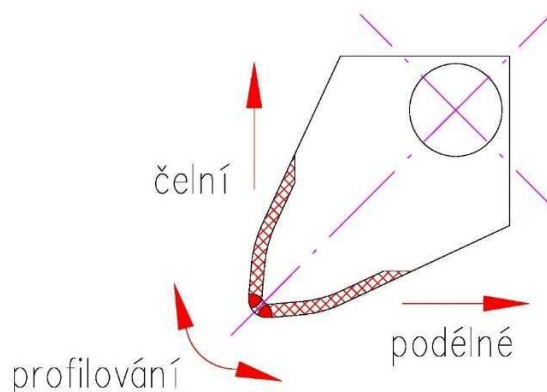
Obr 1.11.: Rozložení sil a mechanismus dělení třísky [20]

Rozdíly v namáhání hlavního břitu vyměnitelné břitové destičky mezi konvenčním, zpětným soustružením spočívá u zpětném soustružení v rozložení namáhání nástroje na větší plochu. To má za následek větší životnost nástroje než u nástroje použitého při konvenčním obrábění. Na obrázku 1.11 lze pozorovat namáhané plochy vyměnitelné břitové destičky soustružením se zpětným posuvem. Na nové metodě při zpětném posuvu nedochází k tak výraznému opotřebení špičky nástroje, ale namáhání je rozloženo na větší ploše řezného břitu nástroje. [5]



Obr 1.12.: Namáhaná část břitu při soustružení se zpětným posuvem [5]

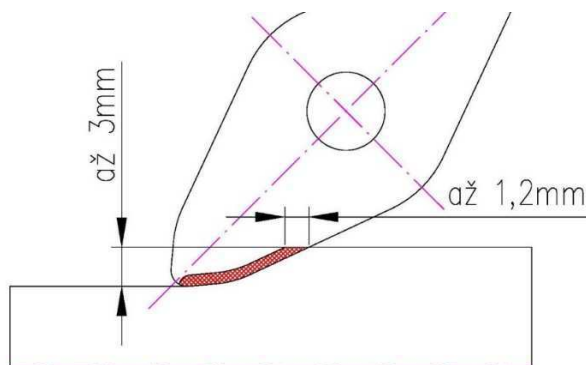
Na obrázku 1.12 jsou znázorněny jednotlivé oblasti namáhání vyměnitelné břitové destičky při různých typech obráběných ploch u soustružení se zpětným posuvem. Oblasti jsou děleny na základě obráběné plochy do třech oblastí – při čelním, podélném a tvarovém soustružení. Vyměnitelná břitová destička pro soustružení se zpětným posuvem využívá větší část břitu, což má mít za následek prodloužení životnosti vyměnitelné břitové destičky, u konvenčního soustružení, kdy je namáhána VBD zpravidla pouze na špičce nástroje a jeho blízkém okolí, pro každý obráběný typ plochy je zapotřebí jiný řezný nástroj. [5]



Obr 1.13.: Oblasti namáhání VBD pro jednotlivé typy soustružení [5]

1.6 Tvorba, obvod a velikost třísky

U soustružení se zpětným posuvem nástroje převážně dochází k pohybu od upínacího vřetene. Třísky se tím pádem nemůžou usazovat u vřetene stroje, kde mohou způsobit poškození povrchu obrobené plochy nebo zničení nástroje. Důležité při řezném procesu je tvorba správné třísky, požadována je malá drobivá tříska. Velká táhlá tříska má vzhledem k velké řezné hloubce až 2 mm a její velikost je způsobena malým úhlem nastavení hlavního ostří. Velmi pevná tvrdá, silná tříska, klade poměrně velký odpor při jejím tvarování a odchodu z místa řezného procesu. [5]



Obr 1.14.: Profil třísky [21]



Obr 1.15.: Fotografie charakteristické třísky vzniklé během experimentu ($v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,6 \text{ mm}$, $a_p = 2 \text{ mm}$)

1.7 Dosavadní poznatky společnosti Sandvick Coromant

Na základě informací od pana Jiřího Rajnocha, obchodního zástupce firmy Sandvik Coromant pro oblast Ostravy a spolupracujícího s VŠB – TUO, obrábění se zpětným posuvem nachází své uplatnění při výrobě krátkých dílců s upínáním v čelistech, kdy je tato technologie využita pouze pro hrubování – tzn. je použita vyměnitelná břitová destička typu B.

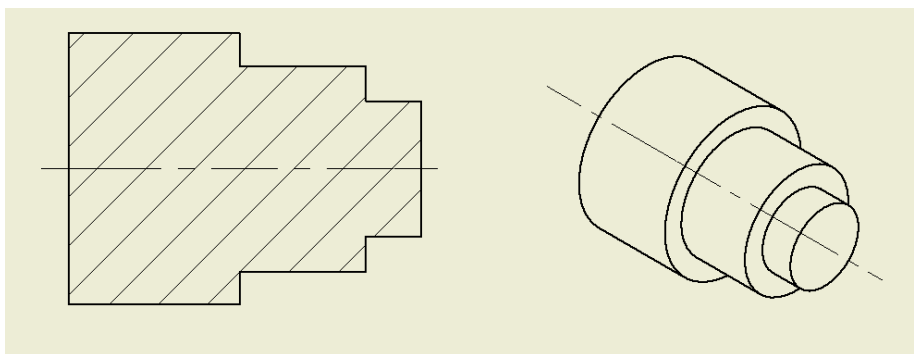
Úskalí technologie obrábění se zpětným posuvem v praxi lpí v 80 % upínání dílu, tuhosti obráběcího centra. S čímž souvisí podstatné problémy se zavedením této technologie do výroby vlivem vibrací a kmitů při řezném procesu a technický stav obráběcího centra. Také upínací tlak na vřeteno se jeví jako nezanedbatelný problém z důvodu životnosti uložení upínacího ústrojí – namáhání ložisek vřetena v axiálním směru.

2. Příprava a pomůcky využívané během experimentální činnosti

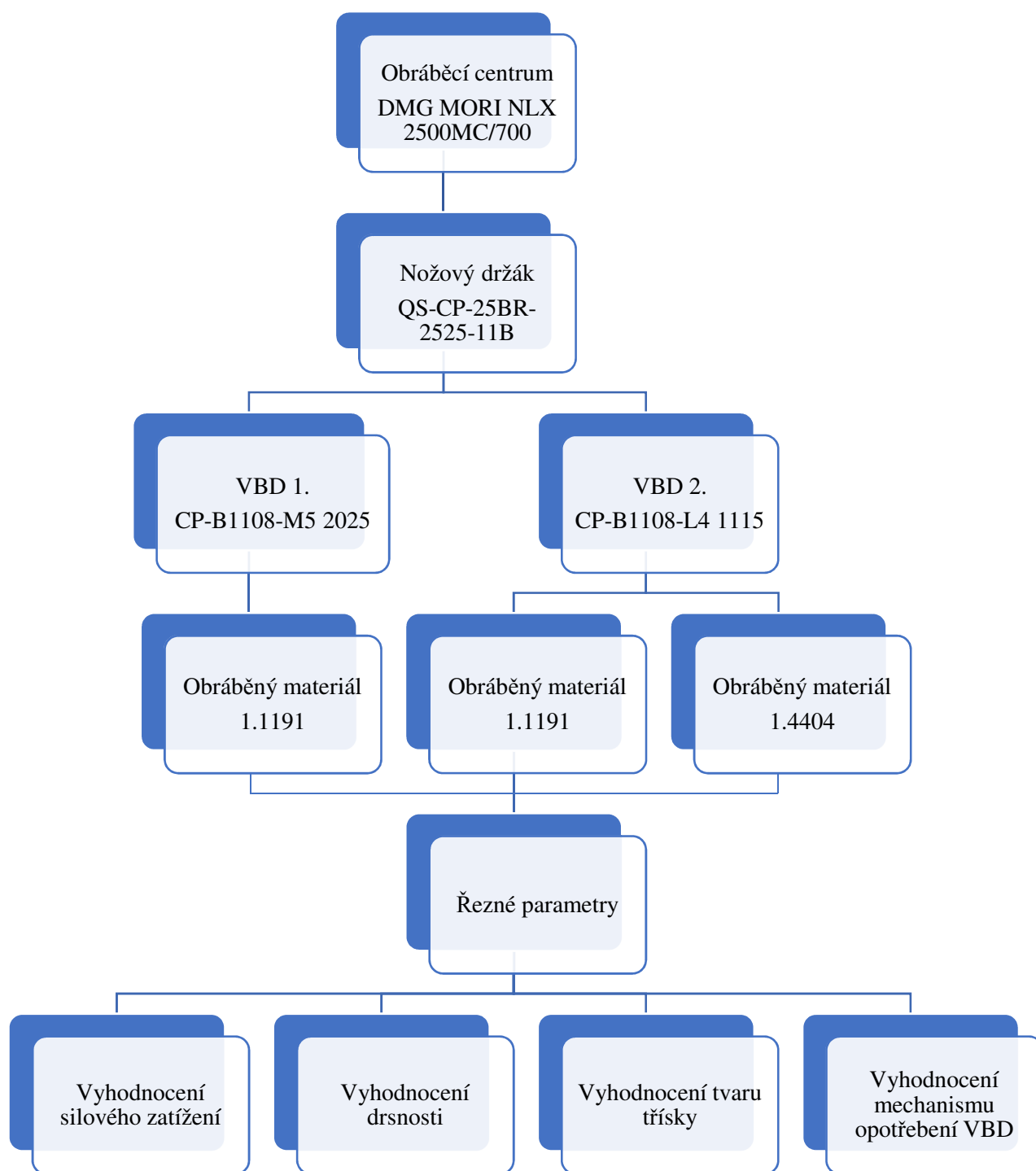
Soustružení se zpětným posuvem je technologie, u které dochází k odebírání svrchní vrstvy obrobku ve formě třísky a tím se vytváří požadovaný tvar výrobku. Při řezném procesu se břit nástroje vtlačuje vysokou silou do povrchu součásti a způsobuje v materiálu elastickou deformaci následně plastickou deformaci a po překonání meze pevnosti obráběného materiálu dojde k oddělení svrchní vrstvy materiálu ve formě třísky.

Jako jedna z nejdůležitější charakteristických vlastností materiálu pro technologii obrábění je jeho obrobitelnost, která určuje celý proces obrábění, volbu řezného materiálu, geometrii řezného nástroje. Nástroj a jeho materiál ovlivňuje složky řezné síly, teplo, jenž v procesu vzniká a jeho odvod z oblasti řezu. Požadavek je odvádět co nejvíce tepla pomocí třísky a jejím rychlým odvodem od nástroje a obrobku. Zlepšení tvorby a obvodu třísky se dosahuje pomocí řezné geometrie, způsobem oddělování třísky a utvařečem třísky. Teplo, jenž je přeneseno do nástroje, způsobuje degradaci a opotřebení povlaku a základního materiálu nástroje, z toho vyplývá nižší trvanlivost řezného nástroje. Teplo přenesené z procesu obrábění do součásti způsobuje geometrickou a rozměrovou nepřesnost a negativně ovlivňuje chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti součásti.

Experimentální činnost a její následné vyhodnocení bere v potaz pouze procesní a řezné parametry soustružení. Z důvodu přesné geometrie řezného nástroje, popřípadě změnou řezného materiálu či povrchové úpravy VBD. Řezné parametry soustružení ovlivňují obrobitelnost materiálu, povrch obrobené plochy, výsledný stav a trvanlivost řezného nástroje. Volba řezných parametrů bude probíhat v celém rozsahu zvolené vyměnitelné břitové destičky a z ohledu na využití v praxi a na obráběcím centru využívaného k experimentu. Obrázek 2.1 znázorňuje návrh obráběné součásti.



Obr 2.1.: Schéma obráběné součásti



Obr 2.2.: Skutečné schéma experimentu

V experimentu byly použity níže popsané pomůcky, nástroje, přístroje a byly během něj zaznamenávány údaje o řezné síle a složkách, mikrogeometrie obrobené plochy a opotřebení VBD k daným řezným parametrům.

2.1 Obráběný materiál – 1.1191

V experimentu zpětného soustružení byla k obrábění použita ocel 1.1191 označená podle normy ČSN EN (další možné označení ČSN – 12 050.1, nebo C45). Výchozím polotovarem pro experiment byl použit válec o rozměrech Ø185 x 200 mm.

Uhlíková ocel 1.1191 je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Materiál byl normalizačně žíhán dle ČSN 41 2050. Své využití nachází ve výrobě středně namáhaných strojních součástí, jako jsou hřídele, turbokompresory, větší zubená kola, šneky, rotory, ojnice, pístnice a další. [13]

Tab. 2.1: Chemické složení materiálu 1.1191 (ČSN - 12 050.1) [13]

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Hmotnostní zastoupení [%]	0,42 až 0,45	0,5 až 0,8	0,17 až 0,37	max. 0,25	max. 0,3	Max. 0,3	max. 0,4	max. 0,04

Tab. 2.2: Mechanické vlastnosti materiálu 1.1191 (ČSN - 12 050.1) [13]

Mez kluzu	R_{p0,2}	325	MPa
Mez pevnosti	R_m	540	MPa
Tažnost	A	Min. 17	%
Tvrdost	-	Max. 225	HB
Modul pružnosti v tahu	E	211	GPa
Modul pružnosti ve smyku	G	79	GPa

2.2 Obráběný materiál – 1.4404

Druhý materiál k experimentální části pro soustružení se zpětným posuvem byla použita korozivzdorná ocel 1.4404 značená dle ČSN EN (další možné označení ČSN – 17 349, AISI – 316L). Obráběný polotovar měl rozměry Ø110 x 300 mm.

Jedná se o korozivzdornou chrom niklovou austenitickou nestabilizovanou ocel se zaručenou svařitelností. Své využití nachází v průmyslovém prostředí, je velmi odolná proti důlkové korozi v přítomnosti chloridů. Nejčastěji se využívá v agresivním průmyslovém prostředí a přímořském prostředí, lze jí využít i jako potravinářský materiál. [13] [17]

Tab. 2.3: Chemické složení materiálu 1.4404 (ČSN - 17 349) [13] [17]

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	N
Hmotnostní zastoupení [%]	max. 0,03	max. 2	max. 1	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5	max. 0,045	max. 0,015	max. 0,11

Tab. 2.4: Mechanické vlastnosti materiálu 1.4404 (ČSN – 17 349) [13] [17]

Mez kluzu	R_{p0,2}	min. 190	MPa
Mez pevnosti	R_m	485	MPa
Tažnost	A₅	40	%
Tvrдость	-	max. 215	HB
Modul pružnosti v tahu	E	200	GPa
Modul pružnosti ve smyku	G		GPa

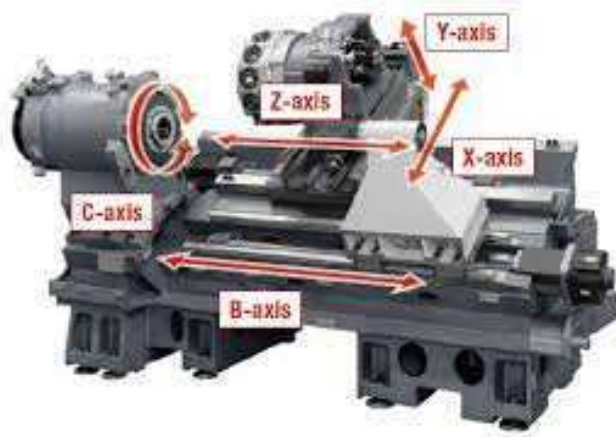
2.3 Obráběcí stroj a procesní médium

a) Obrábějící centrum

Bylo použito obráběcí centrum *DMG MORI NLX 2500MC/700*, jenž je provozováno pracovištěm Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Zařízení splňuje požadavky a nároky pro experiment. Jeho pracovní prostor umožňuje instalaci měřicího zařízení. Dále stroj vyniká vysokou tuhostí a přesností, které mají vliv na přesnost obráběných ploch, se schopností zvládnout variabilní typy obrobků. V těle nástrojové hlavy se nachází vestavěný motor k pohonu nástrojů. Vysoký výkon na vřetení je zajištěn pomocí silného elektrického motoru. [8]

Tab. 2.5: základní parametry obráběcího centra DMG MORI NLX 2500MC/700 [8]

Vřeteno	Otáčky	0 – 4000	min ⁻¹
	Výkon	18,5	kW
Pracovní prostor	Oběžný průměr nad ložem	787	mm
	Maximální délka soustružení	705	mm
	Maximální průměr obrobku	366	mm
	Osa X	260	mm
	Osa Z	795	mm
Nástroje	Počet	12	ks
	Počet poháněných	3	ks
	Výkon poháněných nástrojů	5,5	kW
Posuv	Rychloposuv	30 000	mm



Obr 2.3.: Znáznornění jednotlivých posuvů obráběcího centra [8]



Obr 2.4.: Obráběcí centrum DMG MORI NLX 2500MC/700

b) Procesní médium

Soustružnické centrum využívá pro obrábění chladicí a mazací 7 % roztok *Blasocut 2000 CF* dodávaný firmou Blaser Swisslube CZ, s.r.o.. Tato emulze je mísitelná s vodou, neobsahuje chlór a má univerzální vlastnosti potřebné k obrábění. Splňuje vysoké nároky na řezný výkon a na kvalitu povrchu v oblasti všeobecného obrábění. Její hlavní oblastí využití je lehké, až středné třískové obrábění. [1]

2.4 Použité řezné nástroje

Pro experiment byl zvolen nově vyvinutý systém řezného nástroje pro zpětné soustružení CoroTurn Prime. Aplikované byly dvě vyměnitelné břitové destičky typu B s příslušným držákem.

2.4.1 Vyměnitelná břitová destička

K experimentu měření sil při zpětném soustružení byly použity dvě vyměnitelné břitové destičky typu B, které byly zakoupeny přímo od výrobce nástroje. Destičky jsou označeny dle ISO: *CP-B1108-M5 2025* a *CP-B1108-L4 1115*. Jedná se o břitové vyměnitelné destičky vyrobené ze slinutého karbidu pro obrábění materiálů z austenitických ocelí, feriticko-austenitických ocelí, korozivzdorných, žáruvzdorné, žáru pevných a otěruvzdorných ocelí. [21]

Tab. 2.6: Označení a základní parametry VBD typu B [21]

Typ destičky	CP-B1108-M5 2025	CP-B1108-L4 1115	
Operace	Střední	Střední	-
Poloměr špičky	0,794	0,794	mm
Základní materiál	HC	HC	-
Povlak	CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	PVD (Ti,Al)N+(Al,Cr) ₂ O ₃	-
Tloušťka	5	5	mm
Úhel hřbetu v rovině ortogonální	6°	6°	-
Průměr vepsané kružnice	11	11	mm



Obr 2.5.: VBD typu B

a) Základní materiál vyměnitelné břitové destičky

Základní nosný materiál VBD je označen výrobcem *HC*, je totožný u všech zkoušených VBD, jedná se o směs slinutých karbidů a její složení a mechanické vlastnosti obchodním tajemstvím. K vyhodnocení experimentu, z důvodu absence možnosti ovlivnění mechanického a chemického složení základního materiálu VBD, nejsou vyžadovány přesné znalosti mechanických vlastností a chemického složení vyměnitelné břitové destičky.

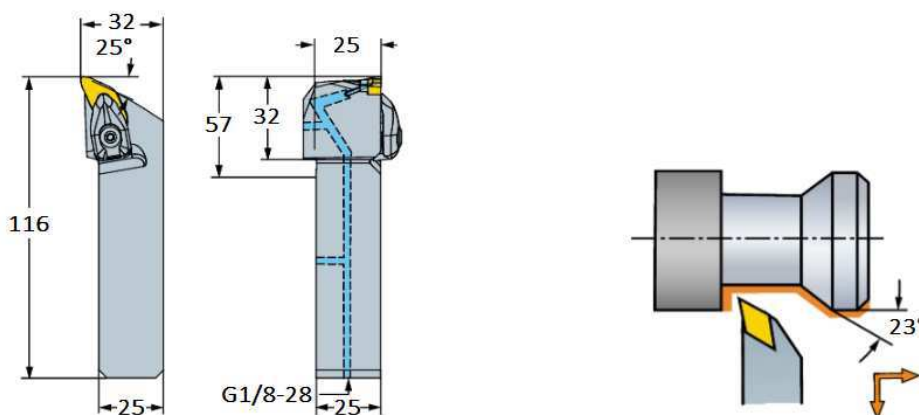
b) Povlak a materiál vyměnitelné břitové destičky

Povrchová úprava vyměnitelné břitové destičky CP-B1108-M5 2025 je provedena technologií *CVD* (Chemical Vapour Deposition), povlak VBD má chemické složení $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$. Jedná se o chemický proces povlakování, založený na reakci při vysoké teplotě plynných chemických sloučenin. Poskytuje VBD lepší řezné vlastnosti, jako je odolnost proti tvorbě opotřebení ve formě žlábků na čele nástroje a odolnost proti difuzi. [24] [25]

Na povrchu vyměnitelné břitové destičky CP-B1108-L4 1115 je nanesený povlak technologií *PVD* (Physical Vapour Deposition) s chemickým složením $(Ti,Al)N+(Al,Cr)_2O_3$. Jedná se o povlak s vysokou odolností, nízkým koeficientem tření s přesnou tloušťkou vrstvy, schopností pokrýt i ostré hrany. [24] [25]

2.4.2 Držák pro vyměnitelnou břitovou destičku typu B

Pro výměnné břitové destičky typu B byl použit držák VBD CoroTurn Prime *QS-CP-25BR-2525-11B* s pevnou upínkou. Držák VBD má zabudovaný systém vnitřního rozvodu pro přívod chladicí kapaliny o maximálním tlaku *150bar*. [23]



Obr 2.6.: Použitý držák VBD [23]

2.5 Měřicí zařízení řezných sil – dynamometr

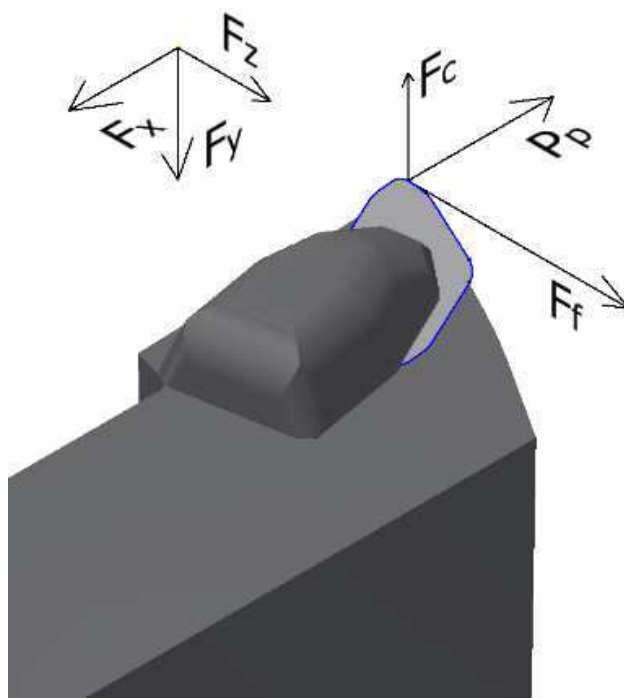
K zaznamenávání sil působící na nůž během obrábění byl použit dynamometr od firmy *Kistler Eastern Europe s.r.o.* složený z měřiče typu *Kistler 9129AA* a zesilovače typu *Kistler 5070A*. Ten posílá data do převodníku typu *Kistler 5697*, který odesílá naměřené hodnoty do počítače, v kterém se zpracovávají pomocí programu *DynoWare*. [11]

Uvedený dynamometr pracuje na principu piezoelektrického jevu. Podstatou měření je deformace přesně tvarovaného krystalu, který je schopen generovat elektrický náboj pod zatížením v určitých směrech.

Měřicí čidlo je složeno z držáku k upevnění revolverové hlavy soustruhu a z měřícího krystalu, na kterém vzniká náboj elektrických částic při mechanickém zatížení. Měřicí čidlo měří tři složky sil v osách interně označených F_x , F_y , F_z (směry složek sil neodpovídají složkám řezné síly a konvencím znázornění sil). Jedná se o tři základní směry sil F_c , F_f , F_p , kdy jejich hodnota je prezentovaná již se správným směrem, převod složek sil proběhl na základě tabulky 2.7 a obrázku 2.9. Kladný směr sil je na růžici F_c , F_p , F_f . [11]

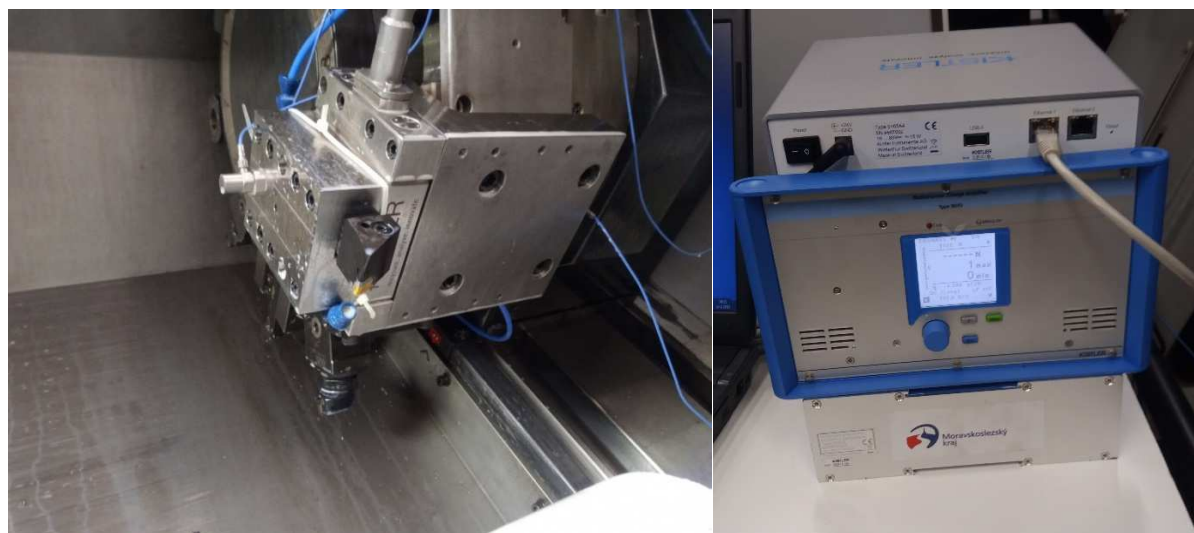
Tab. 2.7.: Převod jednotlivých složek sil na základě obr.: 2.9

Řezná síla	F_c	F_y
Pasivní síla	F_p	F_x
Posuvová síla	F_f	$-F_z$



Obr 2.7.: Složky řezné síly v procesu soustružení

Program *DynoWare* umožňuje detailní záznam a popis jednotlivého měření, například název, jednotlivé řezné parametry nebo obráběný materiál. Také umožňuje analýzu výsledků, jeho částí. Funkce *Statistics analysis* umožňuje znázornění statistických dat jako je maximální, minimální, průměrné hodnoty a hodnotu integrálu (plocha pod křivkou) mezi dvěma body vyčleňující interval pro každou křivku (sílu) zvlášť. Popřípadě program dokáže exportovat naměřená data do dalších formátů (př. *.csv*), nebo umožňuje při exportu dat zvolit oddělovač jednotlivých hodnot, který je důležitý pro zpracování exportovaných dat v dalších programech.



Obr 2.8.: Dynamometr, vlevo - snímač a držák nástroje, vpravo vyhodnovací jednotka dynamometru

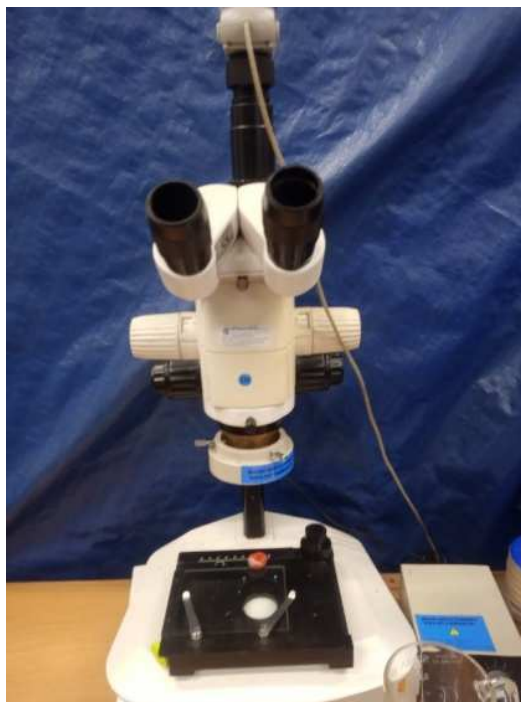
Tab. 2.8.: Technické parametry tříslůžkového dynamometru Kisler [11]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Měřicí rozsah F_x, F_y, F_z	-10 – 10	kN
Citlivost F_x, F_z	≈ -8	$\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Citlivost F_y	$\approx -4,1$	$\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$
Vlastní frekvence f_{nX}	$\approx 3,5$	kHz
Vlastní frekvence f_{nX}	$\approx 4,5$	kHz
Vlastní frekvence f_{nX}	$\approx 3,5$	kHz
Teplotní rozsah	0 – 70	$^{\circ}\text{C}$
Hmotnost	3,2	kg
Rozměry (d x š x v)	90 x 105 x 32	mm

2.6 Zařízení ke snímkování VBD

K měření opotřebení byla použita metoda mikrometrického měření s využitím mikroskopu. K vyhodnocení dat byl využit program *Motic Image Plus 2*.

V experimentu byla po každém měření snímána vyměnitelná břitová destička ke zhodnocení míry opotřebení, k určení oblasti největšího opotřebení a jeho mechanismu v neposlední řadě k určení trvanlivosti VBD. K fotografování vyměnitelné destičky bylo využito zařízení, kterým disponuje Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie a to od českého výrobce *Intraco Micro, spol. s.r.o.* Hlavním prvkem zařízení je optika obsahující objektivy, které umožňují měření v různém zvětšení. Přístroj zajišťuje požadovanou přesnost a opakovatelnost celého měření. [10]



Obr 2.9.: Dílenský mikroskop s připojením k počítači

2.7 Zařízení k měření drsnosti obrobené plochy

Mikrogeometrie povrchu obrobené plochy pro zpětné soustružení byla zkoumaná dle normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 25178-2:2012. Drsnost povrchu byla měřena pomocí přenosného přístroje na měření drsnosti povrchu od výrobce *Mitutoyo* typu *SJ-210*. Měřicí čidlo bylo upevněno pomocí magnetického stojánu poblíž obráběného obrobku. [16]

Tab. 2.9.: Technické parametry přístroje Mitutoyo SJ-210 [16]

Snímací dotek	Diamantový hrot	-
Úhel snímacího hrotu	60	°
Poloměr snímacího hrotu	2	μm
Hmotnost	0,5	kg
Příčný směr	16	mm
Rozsah měření	360	μm

3. Postup, průběh experimentální části

Samotný experiment probíhal ve dvou měření. Druhý experiment byl opakován z důvodu nekorektně naměřených hodnot na dynamometru způsobených průnikem vody do snímače a následném ovlivnění měřených dat. Z prvního měření bylo použito část naměřených dat, viz. kapitola 4.1.

Průběh jednoho měření – cyklus:

Zadání řezných parametrů dle požadavků pro jedno měření. Nastavení dynamometru. Start snímání řezných složek. Následuje náběh nástroje po rádiusové křivce 50 mm od čela obrobku do materiálu za sníženého posuvu a rychlosti. Po vniknutí nástroje do požadované hloubky obráběného materiálu dochází k nárůstu a stabilizaci požadovaných řezných parametrů. Obrábění v celé délce obrobku, až po vyjetí nástroje z čela obrobku. Zastavení obráběcího centra a měřicího zařízení. Uložení naměřených dat. Změření drsnosti povrchu obrobku třikrát, to vždy po pootočení obrobku o 120°. Vyjmutí vyměnitelné břitové destičky a zhotovení snímku břitu a jeho opotřebení. Vložení vyměnitelné břitové destičky do držáku nože. Celý proces se opakuje.

1. První experiment

První experiment probíhal na jedné vyměnitelné břitové destičce s označením *CP-B1108-M5 2025*. Celkově bylo provedeno 16 měření s měnícími řeznými parametry na jednom obráběném materiálu – 1.1191. V průběhu experimentu se měnila pouze řezná rychlost a rychlost posuvu, hloubka řezu a veškeré další parametry byly po celou dobu experimentu konstantní. Během prvního měření se do dynamometru dostala řezná kapalina využívaná v řezném procesu a znehodnotila veškeré výsledky naměřené dynamometrem. Z toho důvodu byl proveden druhý experiment, již bez použití procesního media na dvou obráběných materiálech, viz informace uvedené níže.

Použité zaznamenané údaje k vyhodnocení experimentu z prvního experimentu s řeznou kapalinou přítomnou v řezném procesu byla pouze velikost opotřebení *VBD*. Vyhodnocení poukazuje na mechanismus opotřebení *VBD* při obrábění se zpětným posuvem s procesním mediem. Hodnoty zaznamenané dynamometrem k vyhodnocení experimentu nebyly relevantní.

2. Druhý experiment

Druhý experiment probíhal také na jednom typu vyměnitelné řezné destičky s označením *CP-B1108-L4 1115*. Celkově bylo provedeno 35 měření s měnícími řeznými parametry na dvou obráběných materiálech – 1.1191 a 1.4404. Během řezného procesu nebylo nepoužito procesní medium z důvodu zamezení ovlivnění, popřípadě znehodnocení naměřených dat dynamometru. Během měření byly zatěžovány celkem 4 břity.

Měření č. 1 na materiálu 1.1191 s použitou VBD CP-B1108-M5 2025

Tab. 3.1.: Provedené měření a řezné podmínky pro první experiment na materiálu 1.1191

Pořadí	Obráběný Materiál	Označení	Břit	a_p	f	v_c	Poznámka
-	-	-	-	mm	mm	m/min	-
1.	1.1191	C45_B_SBW_200_06_A01_01	1	2	0,6	200	
2.	1.1191	C45_B_SBW_350_06_A01_02	1	2	0,6	350	
3.	1.1191	C45_B_SBW_300_06_A01_03	1	2	0,6	300	
4.	1.1191	C45_B_SBW_250_06_A01_04	1	2	0,6	250	
5.	1.1191	C45_B_SBW_250_10_A02_05	2	2	1	250	
6.	1.1191	C45_B_SBW_200_10_A02_06	2	2	1	200	
7.	1.1191	C45_B_SBW_300_10_A02_07	2	2	1	300	
8.	1.1191	C45_B_SBW_275_10_A02_08	2	2	1	275	
9.	1.1191	C45_B_SBW_200_08_A02_09	2	2	0,8	200	
10.	1.1191	C45_B_SBW_250_08_A02_10	2	2	0,8	250	
11.	1.1191	C45_B_SBW_275_08_A02_11	2	2	0,8	275	
12.	1.1191	C45_B_SBW_300_08_A02_12	2	2	0,8	300	
13.	1.1191	C45_B_SBW_200_12_A01_13	1	2	1,2	200	
14.	1.1191	C45_B_SBW_250_12_A01_14	1	2	1,2	250	
15.	1.1191	C45_B_SBW_275_12_A01_15	1	2	1,2	275	
16.	1.1191	C45_B_SBW_300_12_A01_16	1	2	1,2	300	

Měření č. 2 na materiálu 1.1191 a 1.4404, použitá vyměnitelná břitová destička CP-B1108-L4 1115

Tab. 3.2.: Provedené měření a řezné podmínky pro druhý experiment na materiálu 1.1191

Pořadí	Obráběný Materiál	Označení	Břit	a_p	f	v_c	Poznámka
-	-	-	-	mm	mm	m/min	-
1.	1.1191	C45_B_SBW_170_06_A01_01	1	2	0,6	170	
2.	1.1191	C45_B_SBW_200_06_A01_02	1	2	0,6	200	
3.	1.1191	C45_B_SBW_230_06_A01_03	1	2	0,6	230	
4.	1.1191	C45_B_SBW_260_06_A01_04	1	2	0,6	260	
5.	1.1191	C45_B_SBW_170_08_A01_05	1	2	0,8	170	
6.	1.1191	C45_B_SBW_200_08_A01_06	1	2	0,8	200	
7.	1.1191	C45_B_SBW_230_08_A01_07	1	2	0,8	230	
8.	1.1191	C45_B_SBW_260_08_A01_08	1	2	0,8	260	
9.	1.1191	C45_B_SBW_170_10_A01_09	1	2	1	170	
10.	1.1191	C45_B_SBW_200_10_A01_10	1	2	1	200	
11.	1.1191	C45_B_SBW_230_10_A01_11	1	2	1	230	
12.	1.1191	C45_B_SBW_260_10_A01_12	1	2	1	260	
13.	1.1191	C45_B_SBW_170_12_A01_13	1	2	1,2	170	
14.	1.1191	C45_B_SBW_200_12_A01_14	1	2	1,2	200	
15.	1.1191	C45_B_SBW_230_12_A01_15	1	2	1,2	230	
16.	1.1191	C45_B_SBW_260_12_A01_16	1	2	1,2	260	

Tab. 3.3.: Provedené měření a řezné podmínky pro druhý experiment na materiálu 1.4404

Pořadí	Obráběný Materiál	Označení	Břit	a_p	f	v_c	Poznámka
-	-	-	-	mm	mm	m/min	-
17.	1.4404	1.4404_B_SBW_170_06_A02_17	2	2	0,6	170	Změna břitu
18.	1.4404	1.4404_B_SBW_200_06_A02_18	2	2	0,6	200	
19.	1.4404	1.4404_B_SBW_230_06_A02_19	2	2	0,6	230	
20.	1.4404	1.4404_B_SBW_260_06_A02_20	2	2	0,6	260	
21.	1.4404	1.4404_B_SBW_170_08_A02_21	2	2	0,8	170	
22.	1.4404	1.4404_B_SBW_200_08_A02_22	2	2	0,8	200	
23.	1.4404	1.4404_B_SBW_230_08_A02_23	2	2	0,8	230	Přetížení
24.	1.4404	1.4404_B_SBW_110_06_A02_24	2	2	0,6	110	
25.	1.4404	1.4404_B_SBW_110_08_A02_25	2	2	0,8	110	
26.	1.4404	1.4404_B_SBW_110_10_A03_26	3	2	1	110	Změna břitu
27.	1.4404	1.4404_B_SBW_110_12_A03_27	3	2	1,2	110	
28.	1.4404	1.4404_B_SBW_140_06_A03_28	3	2	0,6	140	
29.	1.4404	1.4404_B_SBW_140_08_A03_29	3	2	0,8	140	
30.	1.4404	1.4404_B_SBW_140_10_A03_30	3	2	1	140	
31.	1.4404	1.4404_B_SBW_140_12_A03_31	3	2	1,2	140	
32.	1.4404	1.4404_B_SBW_170_10_A03_32	3	2	1	170	
33.	1.4404	1.4404_B_SBW_170_12_A03_33	3	2	1,2	170	
34.	1.4404	1.4404_B_SBW_200_10_A03_34	3	2	1	200	Destrukce břitu
35.	1.4404	1.4404_B_SBW_200_12_A04_35	4	2	1,2	200	Destrukce snímče Kisler

4. Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje

Jak již bylo zmíněno v kapitolách výše, jedním z cílů diplomové práce bylo porovnání, zhodnocení a určení mechanismu opotřebení *VBD* při soustružení se zpětným posuvem technologií *CoroTurn Prime* od firmy *Sandvik Coromant*.

4.1 Mechanismus opotřebení *VBD* CP-B1108-M5 2025 při soustružení s použitím procesního media při obrábění materiálu 1.1191

Opotřebení dvou břitů *VBD* s označením *CP-B1108-M5 2025* lze vidět v tabulkách 4.1 – 4.4, v kterých jsou seřazeny dle pořadí měření a použitého břitu. Do určité mezní hodnoty lze na *VBD* pozorovat pouze změnu zbarvení v oblasti řezu způsobenou tepelným ovlivněním při soustružení a prohřátím *VBD*.

Řezný nástroj vykazoval u všech zkoušených vzorků první rozměrové a geometrické změny na špičce, kde docházelo k plastické deformaci vyměnitelné břitové destičky a následně další velmi mírnou plastickou deformaci v oblasti namáhání břitu. Deformace vzniklá na špičce *VBD* je zapříčiněná vtlačení nástroje do obrobku během počáteční fáze obrábění.



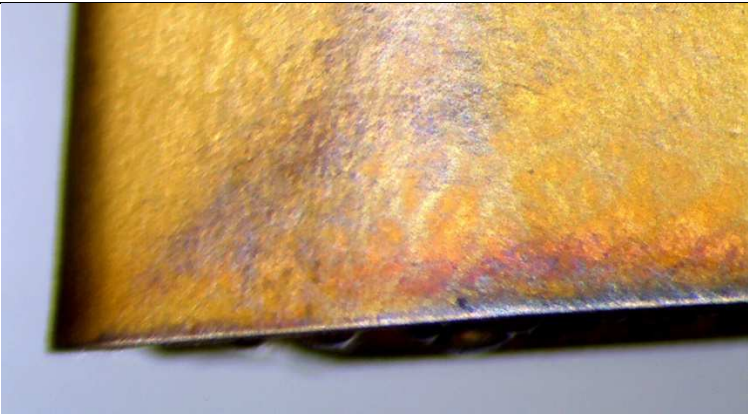
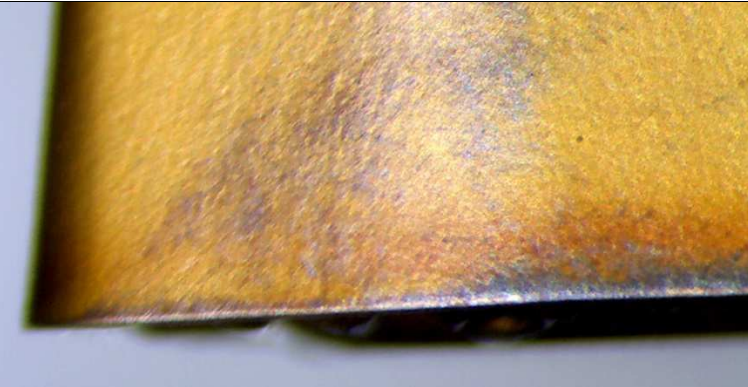
Stanovení trvanlivosti *VBD* na základě provedeného experimentu nelze provést, jelikož experiment nebyl uzpůsobený k měření a určení trvanlivosti *VBD* pro jednotlivé řezné parametry.

Při posledním měření č. 16 z měření č. 1 s nejvyššími řeznými parametry došlo okamžitě při náběhu k vyštípnutí části břitu v oblasti nejvyššího namáhání a přetížení obráběcího centra. Destička před samotným měřením vykazovala velkou plastickou deformaci na špičce a mírnou plastickou deformaci na břitu promáčknutím o velikosti 0,05mm. [9]

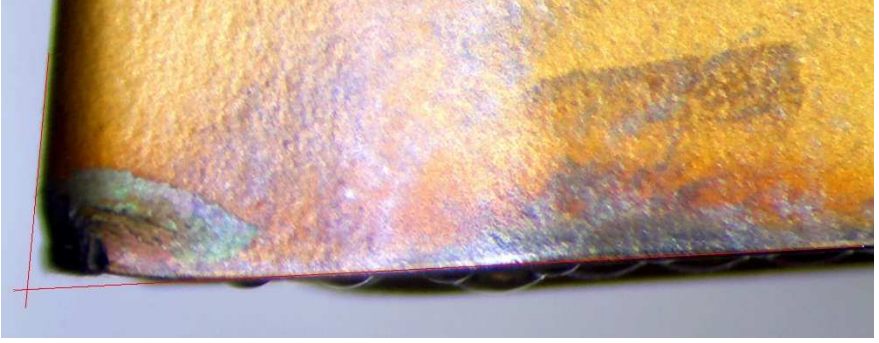
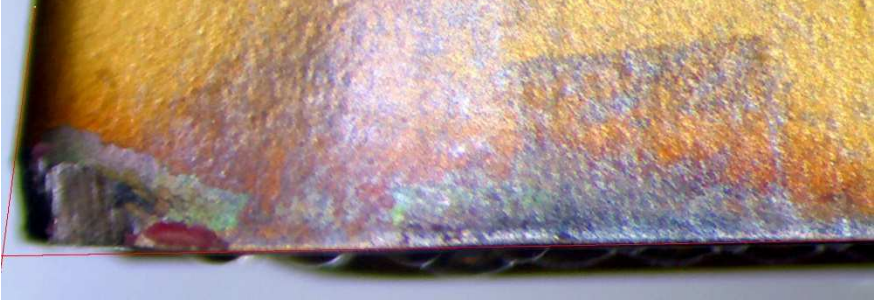
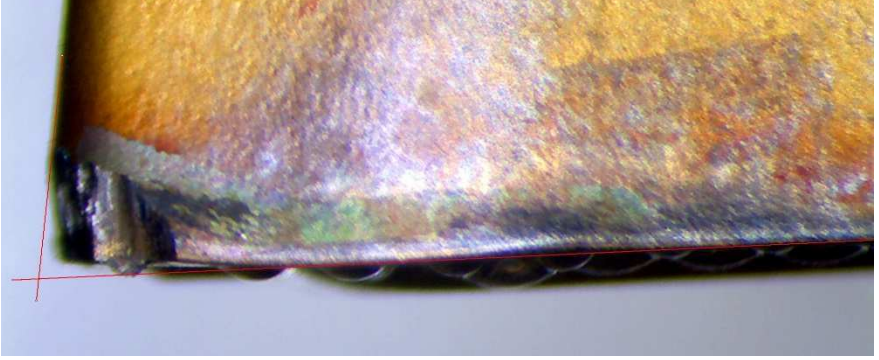



Obr 4.1.: Vyštípnutá *VBD* při $f = 1,2\text{mm}$ a $vc = 300\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při obrábění materiálu 1.1191

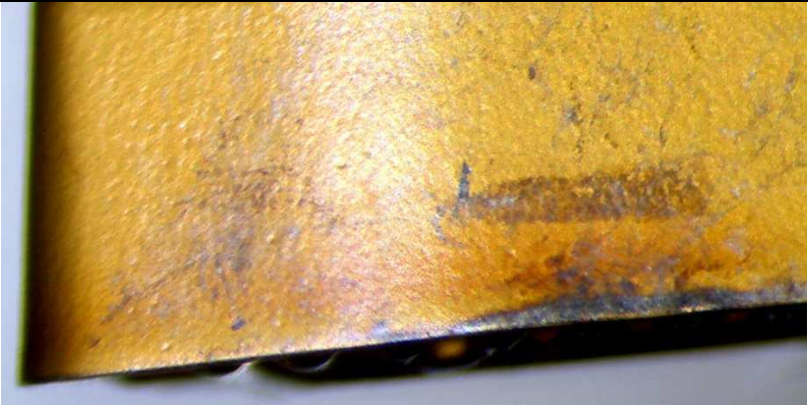



Tab. 4.1.: Opotřebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,6 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 1 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,6 \text{ mm}$ $v_c = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 2 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,6 \text{ mm}$ $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 3 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,6 \text{ mm}$ $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 4 břit: 1	


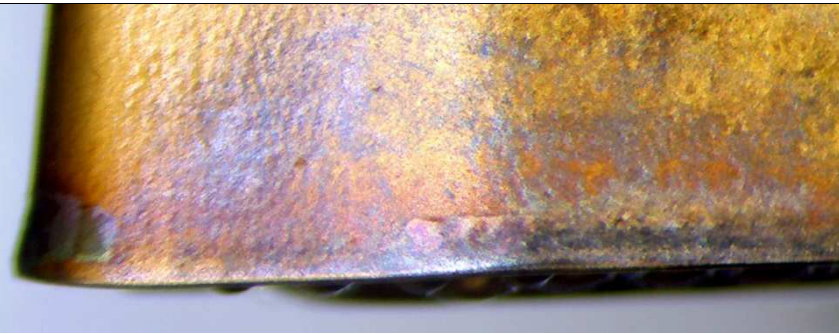


Tab. 4.2.: Opotřebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 13 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 14 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 275 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 15 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 16 břit: 1	

Tab. 4.3.: Opořebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 5 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 6 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 7 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 275 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 8 břit: 2	

Tab. 4.4.: Opotřebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření

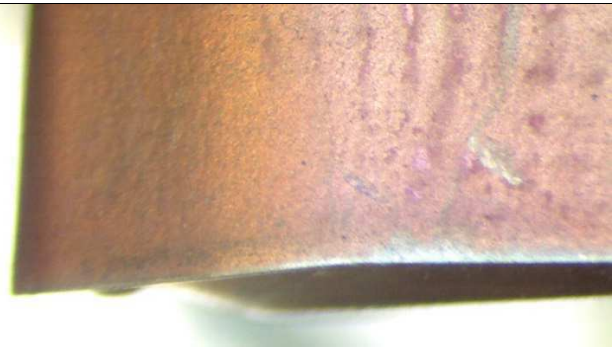

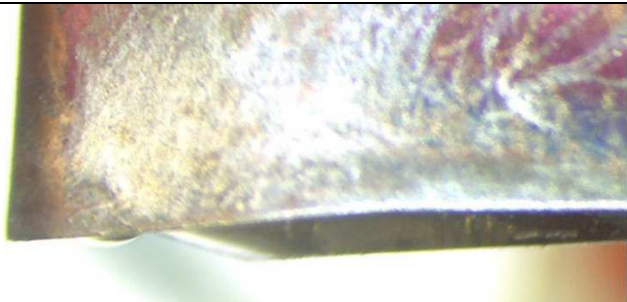
Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 9 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 250$ pořadí měření: 10 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 275$ pořadí měření: 11 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 300$ pořadí měření: 12 břit: 2	

4.2 Mechanismus a opotřebení VBD při soustružení bez přítomnosti procesního média na materiálech 1.1191 a 1.4404


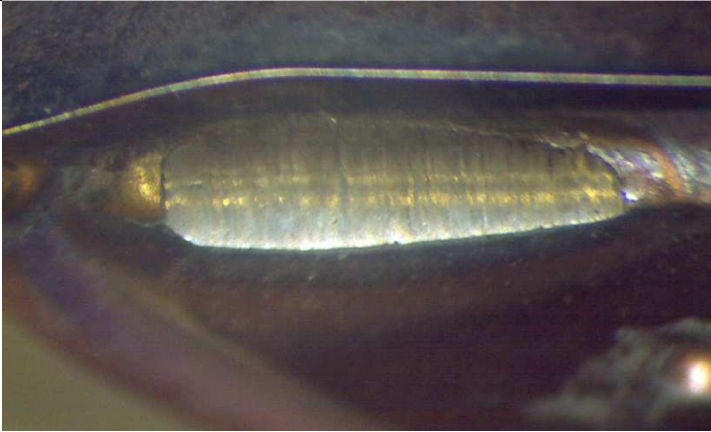
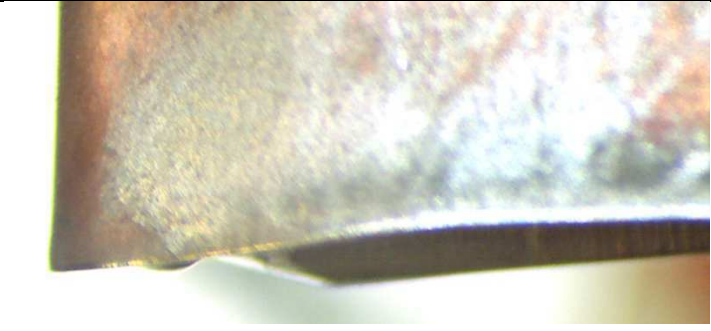

a) Na materiálu 1.1191

V tabulce 4.5 – 4.6 jsou uvedeny selektované snímky VBD typu *CP-B1108-L4 1115*, které charakterizují stupeň opotřebení VBD. Opotřebení bříty nástroje bylo nezměřitelné, došlo pouze k zabarvení bříty a jeho okolí způsobeným vzniklým teplem během řezného procesu. Na špičce není patrné opotřebení, ani plastická deformace způsobená vníkaním nástroje do obrobku. Čelo nástroje vykazovalo žlábkové opotřebení v místě utvářeče třísky a dotyku třísky. Délka žlábků pro měření poslední měření s číslem 16 je 2,95 mm a její šířka je 0,88 mm. Kritériem opotřebení VBD typu *CP-B1108-L4 1115* při obrábění materiálu 1.1191 by byla velikost a hloubka žlábků. Veškeré snímky lze nalézt v příloze C. [9]

Tab. 4.5.: Opotřebení bříty pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.1191

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek bříty
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,6 \text{ mm}$ $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 3 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 5 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 8 břit: 1	

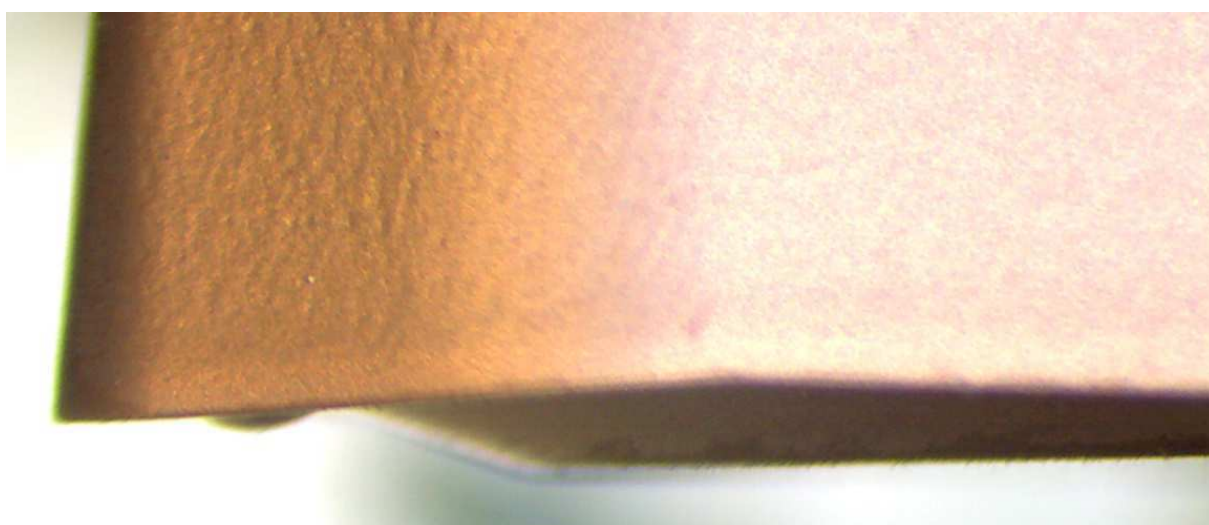
Tab. 4.6.: Opořebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.1191

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 12 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 13 břit: 1	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 16 břit: 1	
	

b) Na materiálu 1.4404


Při soustružení bez procesního média použité při obrábění materiálu 1.4404 docházelo k výraznějšímu a rychlejšímu opotřebení VBD typu *CP-B1108-L4 1115*, v souladu s předpokladem a znalostmi o obráběném materiálu.

V tabulkách 4.7 – 4.8 lze nalézt snímky bříty 2, u kterého došlo k mírné plastické deformaci na špičce VBD a opotřebení bříty v nejvíce namáhané oblasti o $VB_{max} 0,43 \text{ mm}$. Před samotnou deformací VBD došlo ke ztrátě povlaku a odkrytí základního materiálu nástroje, tato ztráta povrchu byla pravděpodobně způsobená kombinací vzniklého tepla a tlaku během procesu. Hlavním kritériem životnosti VBD u bříty č. 2 bude velikost opotřebení hřbetu. [9]



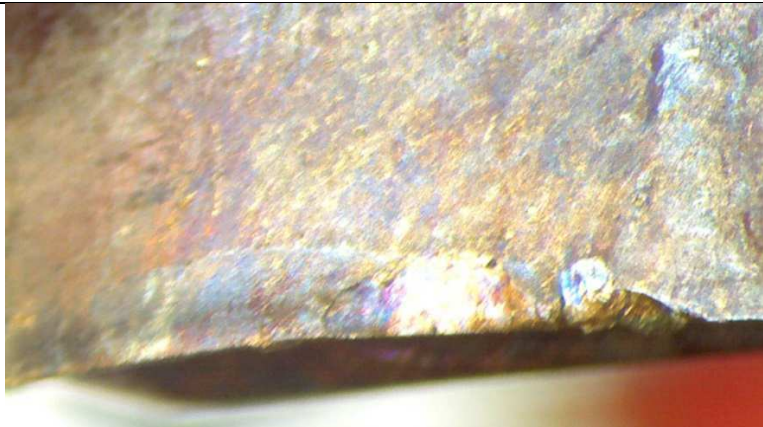


Obr 4.2.: Břit vyměnitelné destičky *CP-B1108-L4 1115*, bez jakéhokoliv opotřebení

Tab. 4.7.: Opotřebení bříty pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.4404

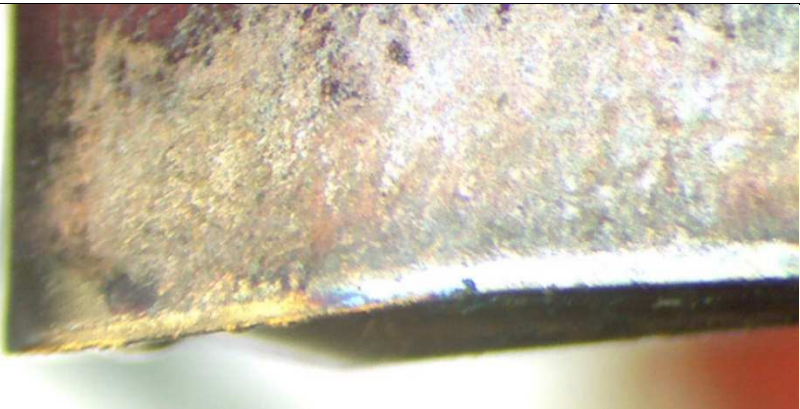
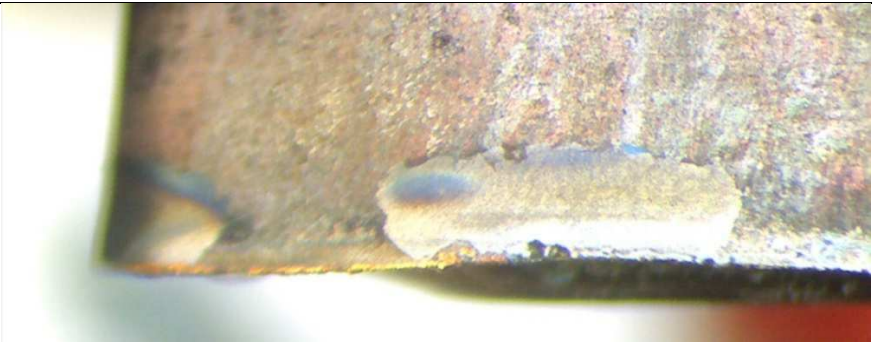

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek bříty
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 22 břit: 2	

Tab. 4.8.: Opořebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.4404




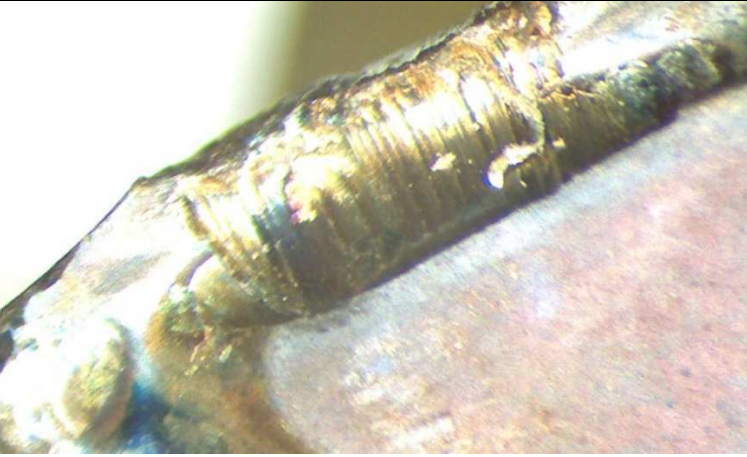
Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 23 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 24 břit: 2	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 0,8 \text{ mm}$ $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 25 břit: 2	

Níže uvedené tabulky znázorňují břit s číslem 3, jedná se o stejné obrábění při jiných řezných parametrech. U tohoto břitu lze v průběhu soustružení také pozorovat prvotní tepelnou zbarvenou oblast v místě namáhání, následnou ztrátu povlaku VBD a konečné opotřebení hřbetu ve velikosti VB_{max} 0,753 mm a žlábků na čele nástroje o délce 3,22 mm a šířce 0,68 mm.

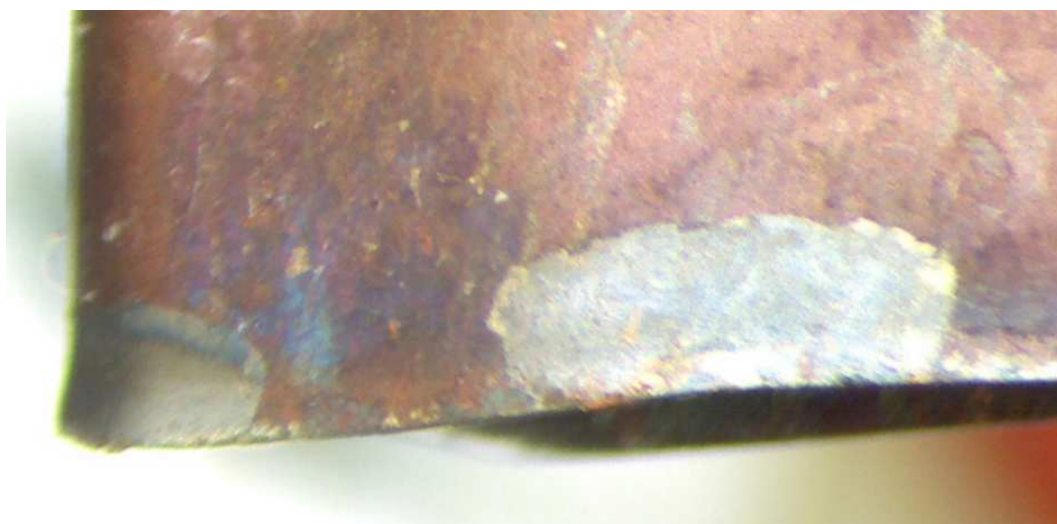
Tab. 4.9.: Opotřebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.4404

Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 140 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 30 břit: 3	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 140 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 31 břit: 3	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 32 břit: 3	

Tab. 4.10.: Opotřebení břitu pro jednotlivé řezné parametry, seřazené na základě pořadí měření na materiálu 1.4404

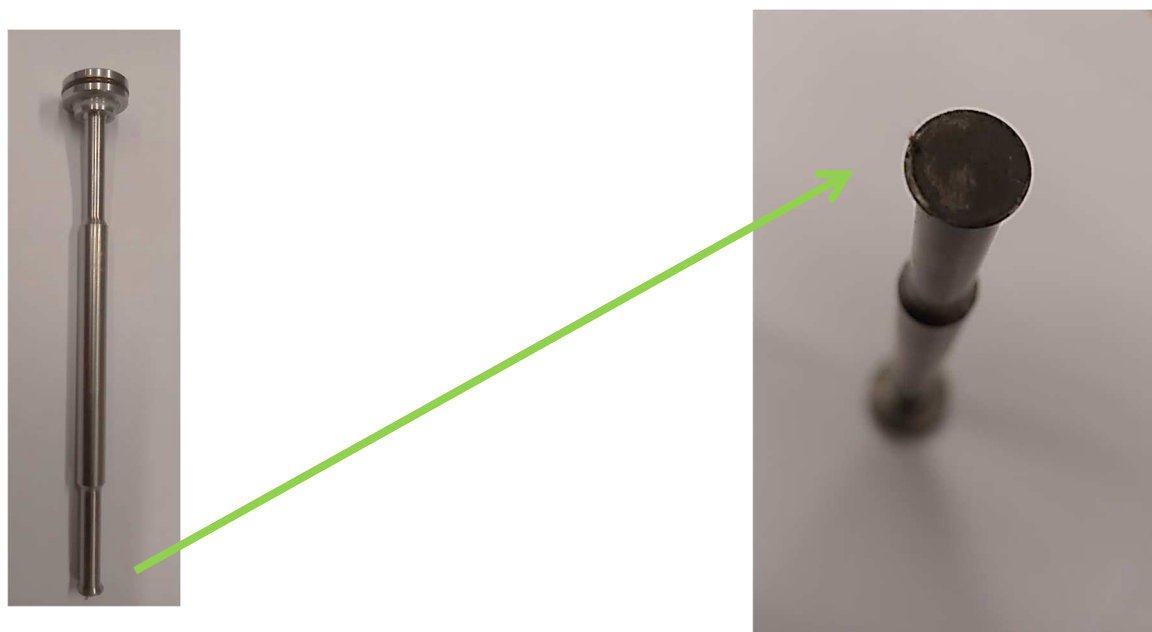
Řezné parametry, pořadí měření	Snímek břitu	
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1,2 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 33 břit: 3		
		
$a_p = 2 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ mm}$ $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pořadí měření: 34 břit: 3		
		

Na obrázku 4.3 je znázorněný snímek posledního břítu s číslem 4. Jedná se o jediný řez na nové VBD za nejnáročnějších podmínek s nejvyššími řeznými parametry při měření s pořadím 35. Na nástroji s vyměnitelnou břitovou destičkou *CP-B1108-L4 1115* lze ihned pozorovat již identifikované charakteristické opotřebení při soustružení materiálu *1.4404* bez přítomnosti řezné emulze. Jedná se o zbarvení VBD v namáhané oblasti, plastické deformace na špičce nástroje a odloupenutí povlaku ze základního materiálu VBD.



Obr 4.3.: Opotřebení břítu po jediném měření, řezné parametry $a_p = 2\text{mm}$, $f = 1,2\text{mm}$, $v_c = 200\text{ m min}^{-1}$, břit č. 4

Během tohoto měření došlo k poruše na snímači dynamometru, u kterého došlo ke křehkému lomu na jedné z tyčí snímače. Destrukce součásti byla pravděpodobně způsobena přetížením snímače během náběhu VBD do obrobku, kdy snímač zaznamenal špičkovou sílu F_c přes 10 kN .

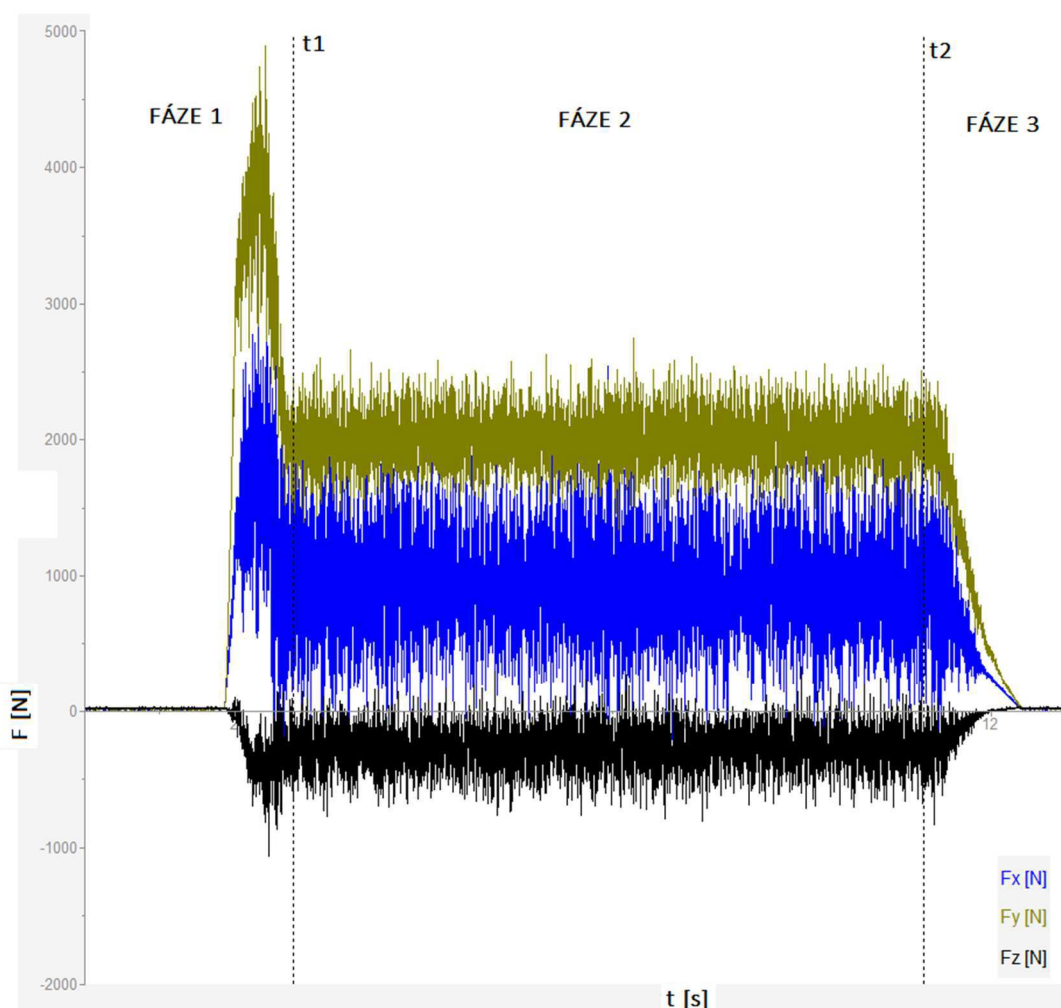


Obr 4.4.: Křehký lom na svazovací tyči ze snímače dynamometru

5. Vyhodnocení řezných sil při soustružení se zpětným posuvem

Během zpracování výsledků došlo ke kombinaci dvou programů. První je *DynoWare*, jenž umožnil znázornění naměřených výsledků a druhý program je *Excel*, ve kterém byl proveden výpočet sledovaných parametrů z exportovaných dat. Ke kombinaci programů došlo z důvodu absence možnosti uložit změny a výpočty v programu *DynoWare*.

V programu *DynoWare* došlo pouze k exportu dat a určení časového intervalu k vyhodnocení měření na základě průběhu měřené veličiny. Během řezného procesu docházelo ke třem fázím. První fáze je vnikání *VBD* do obrobku a během této fáze dochází i k ustálení řezných podmínek. Druhá fáze je část ustáleného obrábění beze změn řezných parametrů. V třetí fázi dochází k ukončení obrábění a vyjetí nástroje z obrobku. Naměřená data byla vyhodnocena pro druhou fázi.



Obr 5.1.: Grafické znázornění v průběhu měřené síly se znázorněnými fázemi

5.1 Algoritmus pro vyhodnocující dat:

Časový interval k vyhodnocení údajů: $t_2 - t_1$, ke snímání hodnot docházelo každých 0,002s

kde t_1 počáteční čas fáze 2,

t_2 konečný čas fáze 2.

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_i \quad [5.1]$$

kde \bar{F} je aritmetický průměr síly v určitém směru,

F_i je hodnota síly,

n je počet hodnot.

Ve výpočtech byl vyhodnocen i medián hodnoty síly, kdy se porovnávala odchylka od střední aritmetické hodnoty počítané síly. Jelikož medián není citlivý na extrémní hodnoty z vyhodnoceného souboru dat, tak velikost rozdílu od aritmetického průměru může odhalit špatně určenou druhou fází rezného procesu nebo extrémní chybné naměřené hodnoty. Výsledek je zaznamenám pouze v příloze B.

$$\Delta = \bar{F} - Me \quad [5.2]$$

kde Δ je rozdíl aritmetického průměru síly a mediánu síly,

Me je medián síly.

$$f(F_{max}) \geq f(F); F_{max} \in < t_2 - t_1 >; F_i \in < t_2 - t_1 > \quad [5.3]$$

kde F_{max} je maximální hodnota síly.

$$f(F_{min}) \leq f(F); F_{min} \in < t_2 - t_1 >; F_i \in < t_2 - t_1 > \quad [5.4]$$

kde F_{min} je minimální hodnota síly.

$$F\delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \right| \cdot 100 \quad [5.5]$$

kde $F\delta$ je průměrná relativní chyba síly.

$$F_c = F_y$$

$$F_f = -F_z$$

$$F_p = F_x \quad [5.6]$$

- kde F_c je řezná složka výsledné síly soustružení,
 F_f je posuvová složka výsledné síly soustružení,
 F_p je pasivní složka výsledné síly soustružení,
 F_x je síla působící kolmo k ose obrobku,
 F_y je síla působící tangenciálně na obrobek,
 F_z je síla působící axiálně na obrobek.

$$F_v = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [5.7]$$

- kde F_v je výsledná síla soustružení.

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_i \quad [5.8]$$

- kde Ra je průměrná aritmetická odchylka profilu.

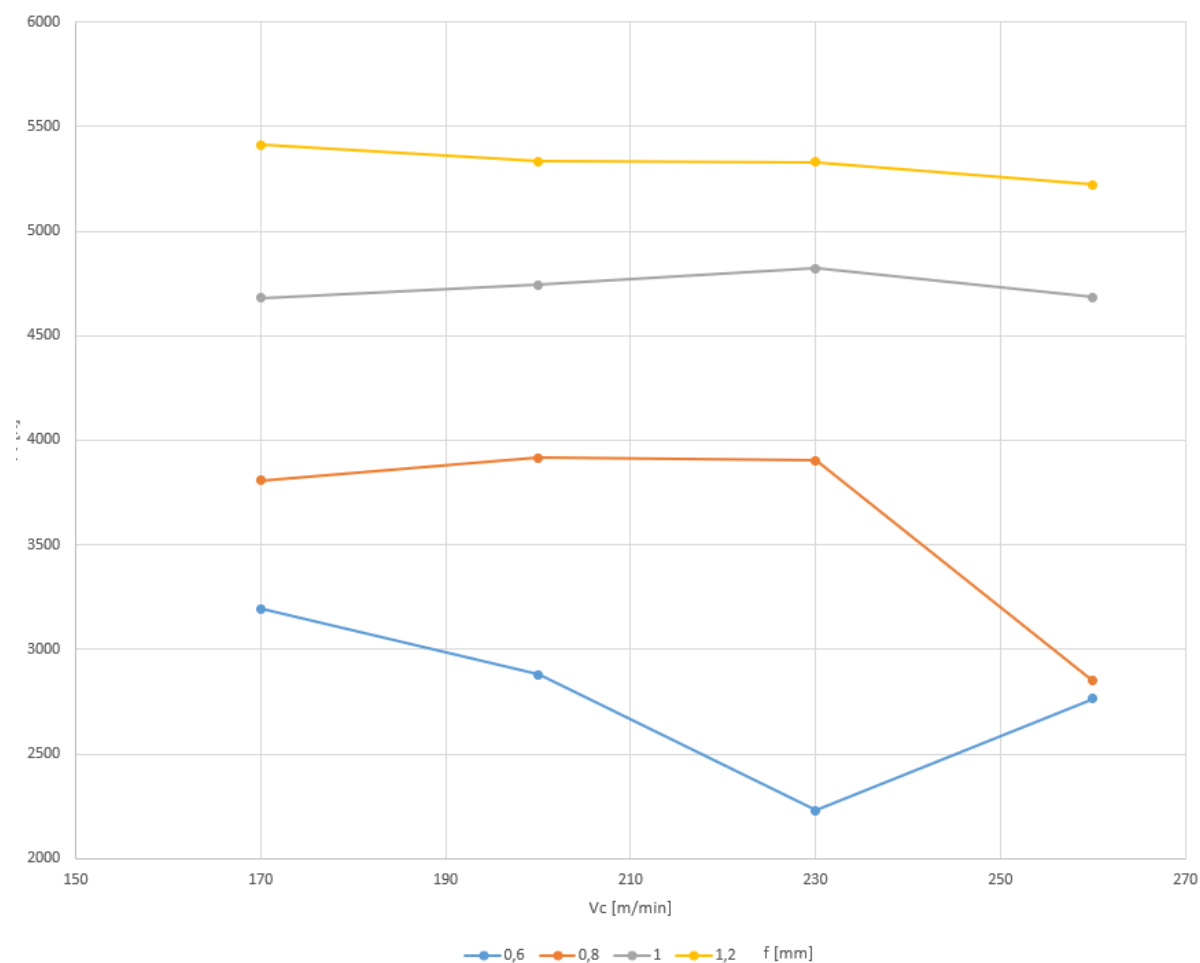
$$\overline{Rz} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Rz_i \quad [5.9]$$

- kde Rz je maximální nerovnost profilu.

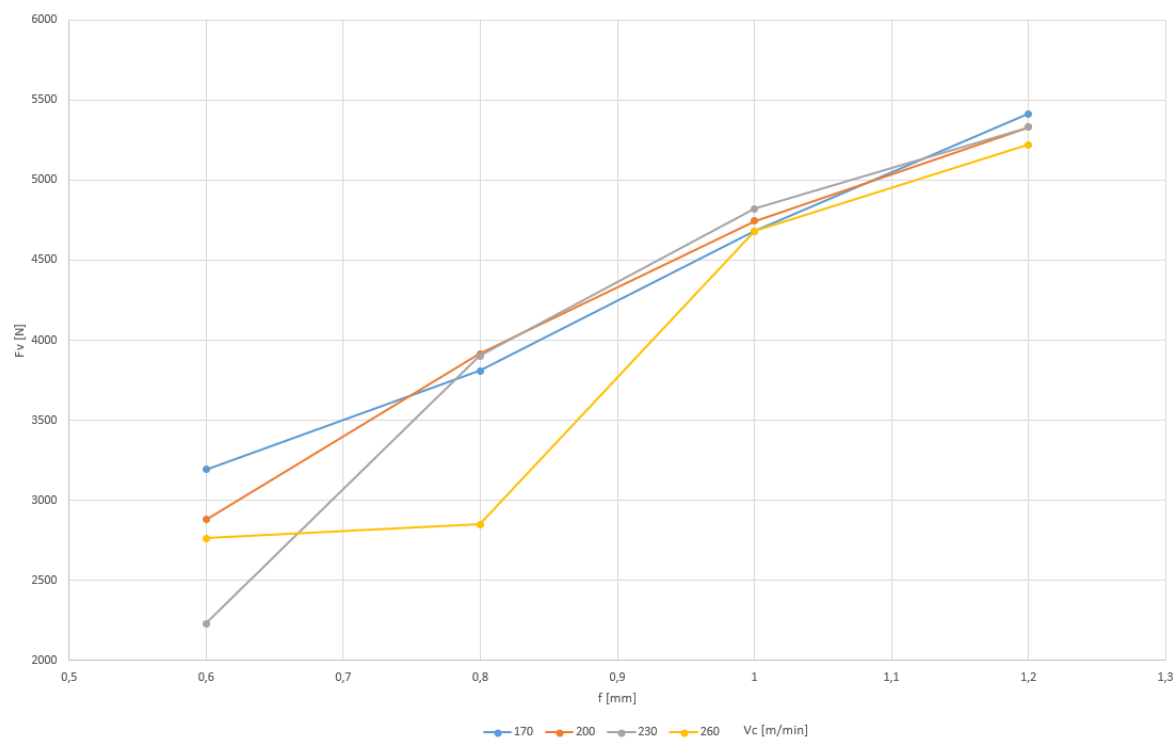
5.2 Změřené hodnoty na materiálu 1.1191 při soustružení se zpětným posuvem bez procesního média

Tab. 5.1.: Výsledky z měření na materiálu 1.1191

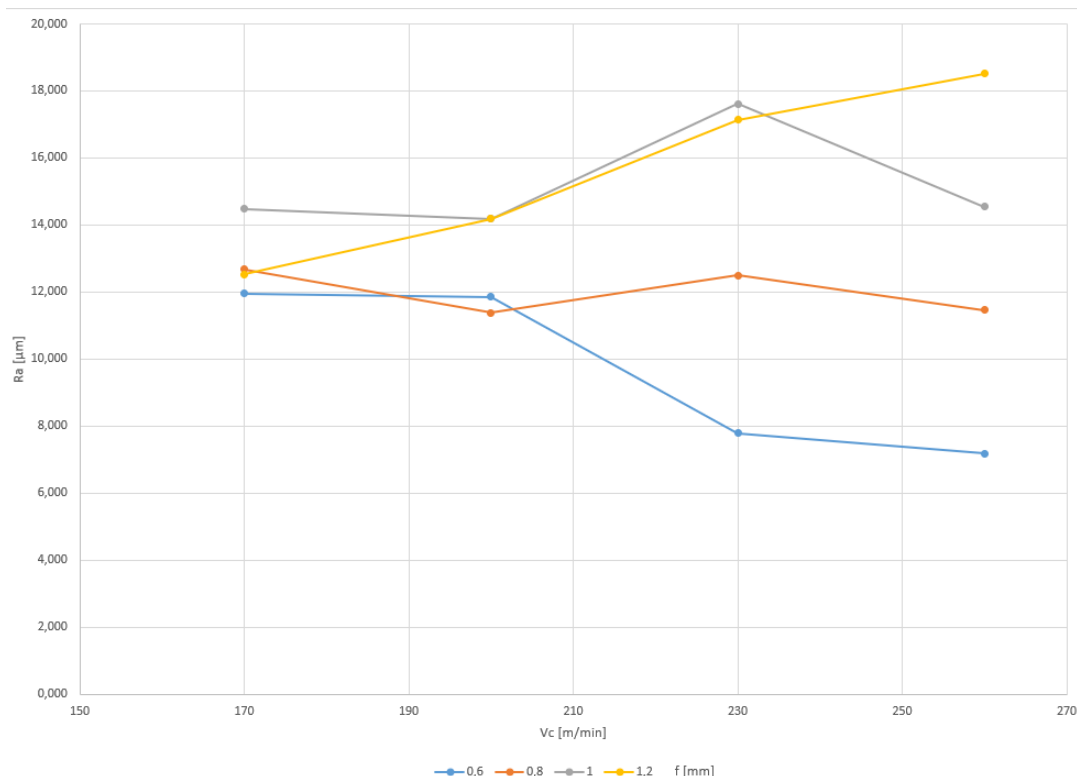
Pořadí:		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
Materiál	-	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191	1.1191
Třída	-	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115
Břit	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2
v_c	m/min	170	200	230	260	170	200	230	260	170	200	230	260	170	200	230	260
R_a	μm	11,95	11,85	7,782	7,183	12,67	11,38	12,48	11,45	14,48	14,17	17,61	14,55	12,52	14,18	17,14	18,50
R_z	μm	61,016	57,132	37,148	31,045	59,519	58,590	56,711	53,906	62,927	65,975	79,578	66,948	55,495	64,252	72,576	74,722
F_c	N	2868	2580	2009	2516	3394	3527	3516	2584	4167	4306	4368	4288	4883	4930	4908	4864
F_{c max.}	N	3318	3067	2218	2777	4005	4424	3961	2969	4708	5677	5376	5064	5487	6237	6029	5633
F_{c min.}	N	2437	2063	1854	2322	2827	2770	3111	2158	3572	3371	3217	3570	4226	3567	3547	3931
F_{δ c}	%	3,96	6,22	1,92	1,93	3,68	4,92	2,89	3,53	3,21	6,08	6,20	6,25	3,24	6,54	5,95	4,16
F_f	N	413	349	267	321	513	515	511	329	632	578	573	506	547	484	212	494
F_{f max.}	N	527	460	339	439	657	656	616	439	811	787	771	686	776	802	426	672
F_{f min.}	N	271	243	209	226	355	393	388	207	441	375	307	314	348	235	-75	294
F_{δ f}	%	6,28	6,87	5,07	6,98	6,08	5,97	5,63	8,79	6,09	9,70	9,32	7,09	10,24	15,60	27,17	9,09
F_p	N	1308	1141	929	1091	1619	1618	1605	1133	2018	1888	1914	1768	2234	1950	2047	1807
F_{p max.}	N	1974	1992	1185	1446	2449	1955	2147	1987	2752	2379	2888	2755	3200	2936	2880	2575
F_{p min.}	N	611	246	686	755	763	1222	1020	436	1429	1264	829	740	1135	1209	1201	866
F_{δ p}	%	19,11	33,94	6,04	6,40	14,70	5,62	10,10	17,79	10,58	7,47	18,56	9,12	15,88	9,93	10,49	12,78
F_v	N	3194	2880	2230	2763	3808	3917	3903	2851	4680	4743	4823	4682	5413	5332	5330	5221
F_{v max.}	N	3573	3260	2463	3024	4383	4769	4428	3276	5263	6108	5822	5480	6030	6625	6599	5936
F_{v min.}	N	2814	2491	2031	2542	3386	3147	3414	2345	4070	3799	3723	3989	4669	4226	4015	4381
F_{δ v}	%	2,66	3,40	1,89	1,88	2,95	4,34	3,28	3,84	2,80	4,95	5,32	3,87	3,35	5,64	5,40	3,62
Pozn.:																	



Obr 5.2.: Průběh výsledné síly soustružení v závislosti na rychlosti obrábění pro jednotlivé posuvy



Obr 5.3.: Průběh výsledné řezné síly soustružení se zpětným posuvem v závislosti na posuvu pro jednotlivé síly



Obr 5.4.: Průběh mikrogeometrie v závislosti na rychlosti obrábění pro jednotlivé posuvy

Z grafického znázornění obr. 5.2 a 5.3 lze konstatovat, že změna řezných rychlostí nemá zásadní vliv na řeznou sílu obrábění při stejném posuvu. V grafu 5.3 je pozorována takřka stoupající lineární závislost řezné síly při změně posuvu.

Porovnáním grafického znázornění mikrogeometrie a grafického průběhu výsledných sil při konstantním posuvu nelze jednoznačně určit závislost velikosti řezné síly na velikosti průměrné odchylky profilu.

V grafu obr: 5.2 se nachází dva výrazně odlišné body, jež nespadají do předpokladu, jenž jsou níže podrobněji analyzovány. Jedná se o měření 3 a 8.

a) Měření s pořadovým číslem 3.

Jedná se o měření s řeznými parametry $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,6 \text{ mm}$, u kterého došlo k poklesu řezné síly. Tento pokles je nejzřetelnější na obr.: 5.2. Jedná se o nejnižší naměřené hodnoty - viz. tabulka 5.1. Dále vykazuje druhé nejmenší hodnoty mikrogeometrie $Ra = 7,782 \mu\text{m}$ a $Rz = 37,148 \mu\text{m}$ a také s nízkou hodnotu rozptylu naměřených sil ve všech složkách řezné síly. Z toho lze nepřímou usuzovat, že docházelo k nejmenším vibracím během řezného procesu. Opatření VBD před měřeními i po něm bylo pouze v podobě tepelného zabarvení břitů, tabulka 4.5.

b) Měření s pořadovým číslem 8.

S řeznými parametry $v_c = 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,8 \text{ mm}$ lze pozorovat pokles řezné síly o cca 1000 N oproti měření s totožným posuvem. Pokles síly je názorný u obr. 5.2 a 5.3. Ale oproti měření s číslem 3 již nedošlo k poklesu mikrogeometrie povrchu obrobené plochy a hodnota rozptylu hodnot také nejeví pokles. Opotřebení na VBD je pouze v tepelném zbarvení břitu, viz. tabulka 4.5.

Shrnutí měření čísla 3 a 8: Měřicí body ukazují vhodné řezné parametry k nastavení operace obrábění v praxi s předpokládanou vysokou trvanlivostí a životností VBD díky použití nižší řezné síly pro hrubovací operace vzhledem k velikosti mikrogeometrie. Měření č. 8 s řeznou rychlostí $260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,8 \text{ mm}$ vykazoval pravděpodobně vyšší produktivitu díky rychlejšímu úběru kovu. Podrobnější zkoumání opotřebení VBD při řezných parametrech u měření 3 a 8 by poukázalo na vhodnější řezné parametry při soustružení se zpětným posuvem.

5.2.1 Charakteristické třísky soustružení mat. 1.1191

Během celého experimentu docházelo k tvorbě velmi podobných třísek, které jsou znázorněné na obr. 5.5. Jedná se o drobnivé třísky či článkovité se znatelným tepelným ovlivněním, které odcházely po čele VBD a lámaly se o obrobek. Z hlediska bezpečnosti a objemu se jedná o výhodnou a příznivou třísku.



Obr 5.5.: Charakteristické třísky pro obrábění materiálu 1.1191 během experimentu

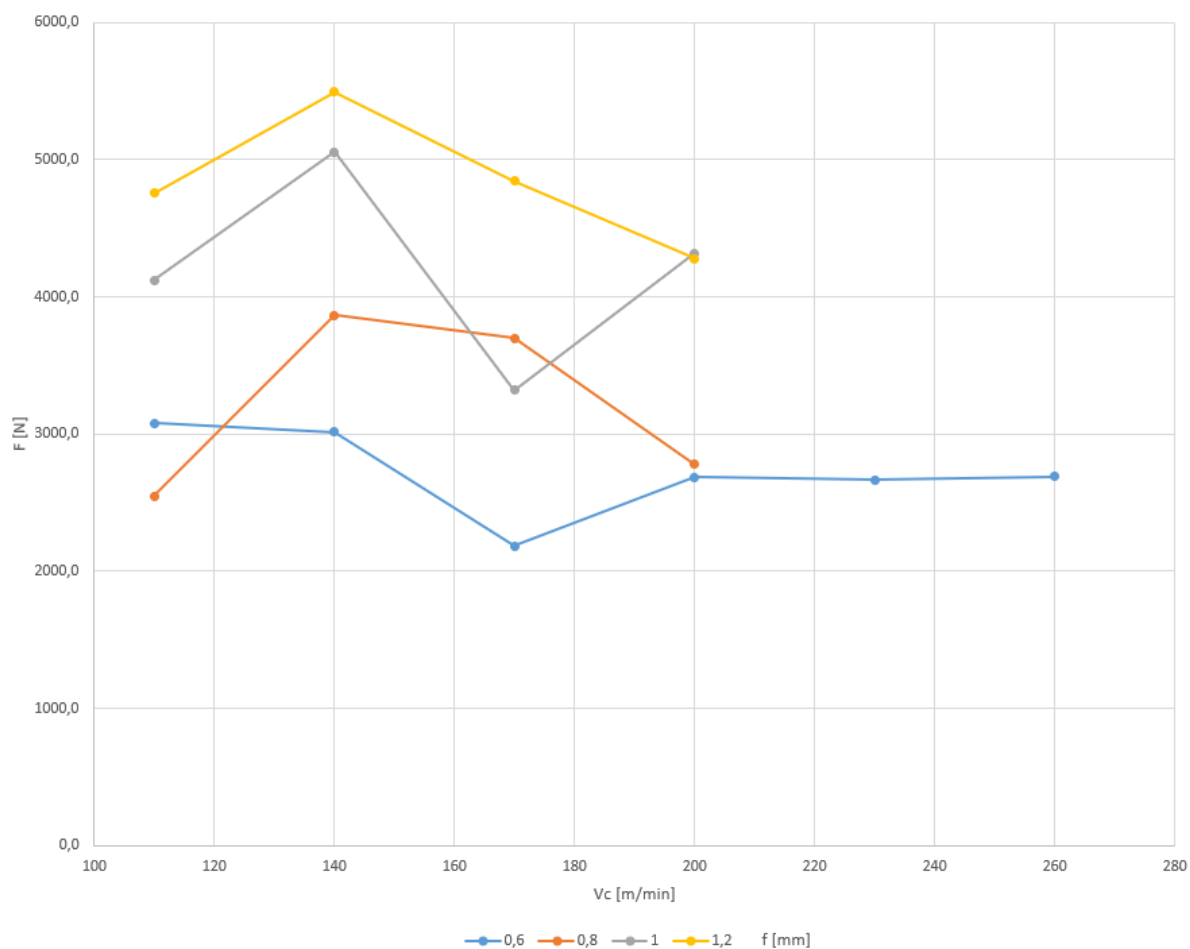
5.3 Naměřené hodnoty na materiálu 1.4404 při soustružení se zpětným posuvem bez procesního média

Tab. 5.2.: Výsledky z měření na materiálu 1.4404

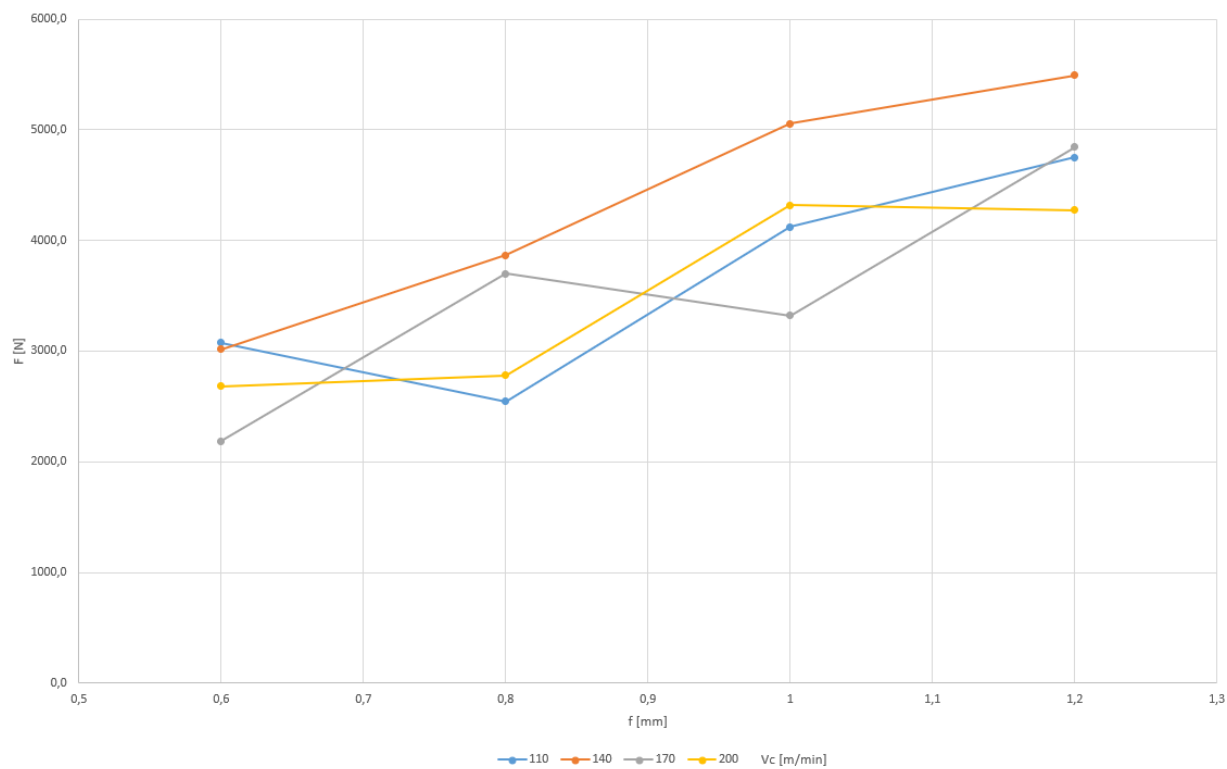
Pořadí:		17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.
Materiál	-	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404
Třída	-	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115
Břit	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	1
v_c	m/min	170	200	230	260	170	200	230	110	110	110
R_a	μm	7,478	12,943	9,301	7,323	18,184	12,613		3,444	6,325	23,399
R_z	μm	39,047	57,132	43,701	40,44	88,879	56,723		18,502	30,489	105,33
F_c	N	1986,6	2462,9	2435,7	2471,0	3331,2	2540,8		2585,5	1750,8	3699,1
F_{c max.}	N	3030,8	6688,6	3581,2	3510,2	5687,0	4123,8		3383,2	2510,5	6421,2
F_{c min.}	N	963,2	12,8	1530,8	1810,7	779,8	1516,2		1685,0	1020,7	1417,1
F_{δ c}	%	18,3	15,1	6,3	5,0	17,7	20,7		7,7	10,6	24,4
F_f	N	244,7	293,0	331,1	290,8	472,0	291,3		545,6	1091,2	514,0
F_{f max.}	N	589,3	680,2	675,0	492,4	870,9	578,5		800,4	1273,4	968,0
F_{f min.}	N	112,5	-326,1	224,5	199,5	204,3	150,8		363,6	921,6	159,6
F_{δ f}	%	21,1	23,7	9,3	9,2	17,3	25,5		8,8	4,7	30,5
F_p	N	872,1	1007,7	1026,4	1019,8	1466,8	1081,7		1570,3	1484,6	1739,1
F_{p max.}	N	1559,6	2340,8	1512,6	1608,5	2647,3	1853,0		2294,8	1952,5	2736,3
F_{p min.}	N	407,0	-14,2	696,4	773,3	293,2	544,3		1180,7	1031,7	890,3
F_{δ p}	%	16,9	16,8	8,5	7,1	21,0	19,3		7,4	9,4	24,2
F_v	N	2184,5	2683,8	2666,0	2690,7	3699,9	2780,0		3077,7	2546,6	4122,3
F_{v max.}	N	3324,3	7032,6	3863,1	3763,9	5949,7	4359,4		4079,9	3380,1	6906,0
F_{v min.}	N	1109,3	31,9	1754,5	2075,0	1296,4	1710,6		2292,7	1822,4	1744,3
F_{δ v}	%	18,0	14,6	6,1	4,7	15,0	20,3		6,6	7,9	24,4
Pozn.:		Změna břitu						Přetížení			Změna břitu

Tab. 5.3.: Výsledky z měření na materiálu 1.4404

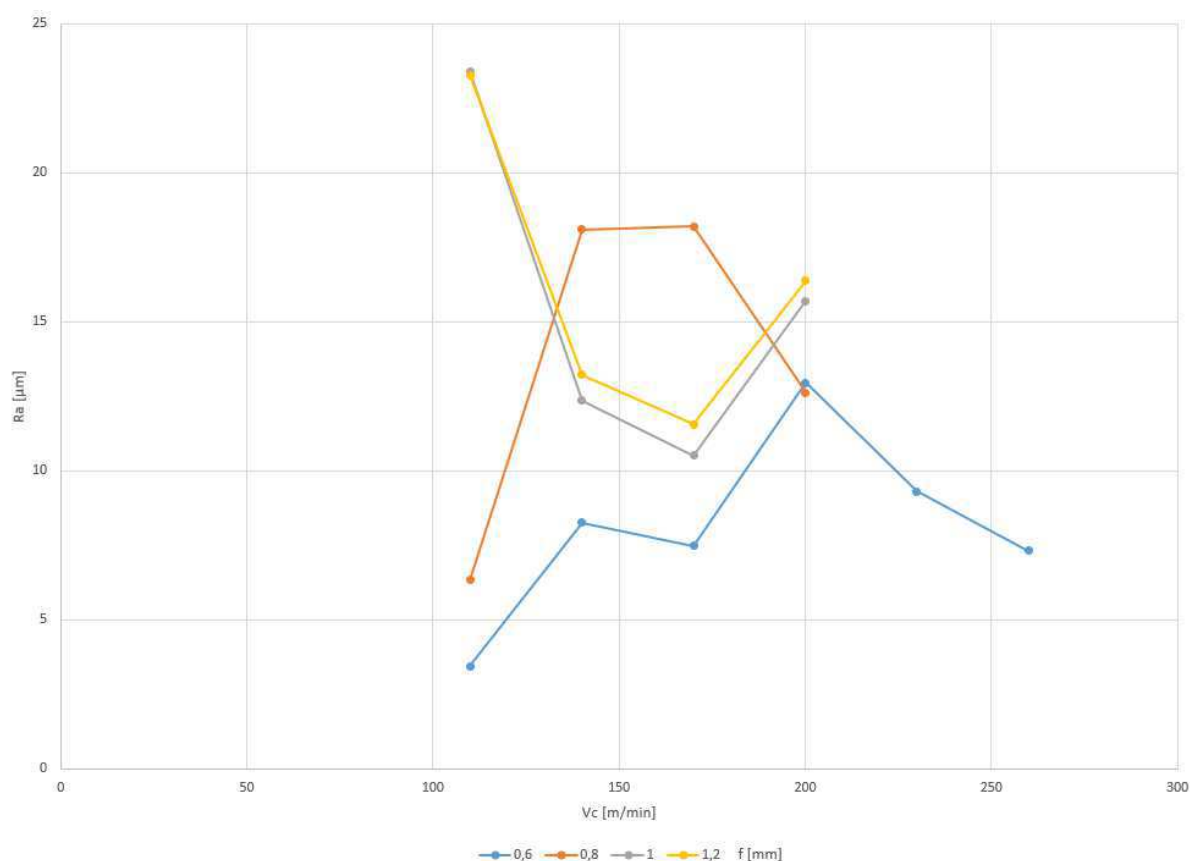
Pořadí:		27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.	34.	35.
Materiál	-	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404	1.4404
Třída	-	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115
Břit	-	3	3	3	3	3	3	3	3	4
a_p	mm	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f	mm	1,2	0,6	0,8	1	1,2	1	1,2	1	1,2
v_c	m/min	110	140	140	140	140	170	170	200	200
R_a	μm	23,28	8,263	18,097	12,35	13,222	10,515	11,558	15,695	16,37
R_z	μm	100,48	33,942	78,02	54,387	53,6	43,343	45,267	69,379	73,221
F_c	N	4216,2	2721,8	3457,0	4502,4	4877,2	3060,2	4520,6	4040,8	3274,1
F_{c max.}	N	5323,0	5029,4	5302,2	5858,3	5979,4	5928,1	7712,9	6850,4	6329,7
F_{c min.}	N	2938,6	539,1	1586,9	3375,8	3765,0	1830,6	1341,9	1299,3	-112,6
F_{δ c}	%	6,2	13,2	10,4	6,3	5,6	20,5	13,9	11,2	34,1
F_f	N	689,5	384,9	485,0	706,0	832,1	613,6	806,9	417,7	447,2
F_{f max.}	N	980,8	845,1	797,1	959,2	1000,1	1061,8	1371,9	1022,0	825,2
F_{f min.}	N	348,6	128,5	216,0	485,9	607,4	374,5	221,9	-62,6	119,8
F_{δ f}	%	9,1	16,2	14,2	7,6	5,4	17,2	17,6	32,0	21,1
F_p	N	2077,2	1212,0	1530,2	2181,7	2378,3	1109,5	1478,6	1428,1	2470,9
F_{p max.}	N	2557,7	2317,6	2959,8	2727,9	2968,0	2233,4	2609,7	2411,2	3366,0
F_{p min.}	N	1269,0	674,2	216,2	1683,9	1702,1	470,9	466,8	327,1	1621,8
F_{δ p}	%	7,0	11,0	31,9	6,3	6,6	26,8	19,1	17,5	11,2
F_v	N	4753,6	3015,3	3864,8	5057,2	5495,1	3320,0	4842,8	4320,2	4276,7
F_{v max.}	N	5936,8	5292,5	5609,5	6424,4	6537,0	6259,7	7906,8	7112,8	6736,1
F_{v min.}	N	3393,2	1201,8	2199,5	3897,1	4591,0	1984,5	1842,8	1705,1	2604,3
F_{δ v}	%	5,7	11,5	8,0	5,3	4,5	20,6	12,9	10,7	16,4
Pozn.:									Destrukce břitu	Destrukce snímače



Obr 5.6.: Průběh výsledné síly soustružení v závislosti na rychlosti obrábění pro jednotlivé posuvy



Obr 5.7.: Průběh výsledné řezné síly soustružení se zpětným posuvem v závislosti na posuvu pro jednotlivé síly



Obr 5.8.: Průběh mikrogeometrie v závislosti na rychlosti obrábění pro jednotlivé posuvy

Z důvodu vyšší náročnosti obrábění materiálu 1.4404 oproti materiálu 1.1191 během fáze 1 a 2 byl změněn interval řezné rychlosti na $<110;200> \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Materiál 1.4404 kladl vyšší řezný odpor a způsoboval přetížení měřící soustavy, obráběcího centra a kladl na VBD nepřiměřeně vysoké nároky, kdy docházelo u břitové destičky takřka ihned k jejímu kritickému opotřebení a možné destrukci.

Rozložení silových poměrů celkové řezné síly soustružení je s nejvyšší hodnotou zastoupená řezná složka síly v intervalu $<1986,6;4877,2> \text{ N}$, pasivní složka síly dosahuje hodnot $<872,1;2470,9> \text{ N}$ a nejnižších hodnot dosahovala posuvová složka síly $<244,7;1091,2> \text{ N}$. Pasivní složka síly s narůstajícím posuvem vykazuje nárůst.

Hodnota výsledné síly soustružení v závislosti na čase může kolísat až o 20 % dle literatury, tento rozptyl hodnot je způsoben nehomogenitou obráběného materiálu, jeho rozdílných mechanických vlastností, způsobem tvorby a oddělení třísky. Z důvodu použití jednoho obrobku pro experiment má dominantní vliv na změnu rozptylu pro jednotlivá měření tvorba a způsob oddělení třísky. Sekundární vliv na rozptyl hodnot síly by mohly mít vznikající vibrace během řezného procesu. [18]

Z obr.: 5.6 lze pozorovat určitý posun křivek v závislosti na velikosti posuvu. Křivka posuvu $0,6\text{ mm}$ má mírný klesající lineární průběh až na odchylku při řezné rychlosti $170\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Zde došlo k silovému propadu na 2184 N s poměrně vysokou procentuální hodnotou rozptylu naměřených sil velikosti 18% a mikrogeometrií $Ra = 7,478\text{ }\mu\text{m}$.

Měření č. 25 při řezných podmínkách $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,8\text{ mm}$, $v_c = 110\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ vykazuje vyrovnané jednotlivé poměry ve složkách výsledné řezné síly s nízkým rozptylem měřených hodnot. Během soustružení byl nástroj namáhán ve třech směrech nejrovnoměrnějším rozložením sil a jeho výsledná síla soustružení je druhá nejmenší z celé sady měření na materiálu 1.4404.

Tab. 5.4.: Výběr výsledků z měření č. 25

Měření č.	Břit	Ra	Rz	F _c	F _f	F _p	F _v	F _{dv}
-	-	[μm]	[μm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[%]
25	2	6,325	30,489	1750,8	1091,2	1484,6	2546,6	7,9

Na obr.5.8 jenž znázorňuje mikrogeometrii obrobených ploch v závislosti na řezné rychlosti lze pozorovat silnou podobnost v průběhu i ve velikosti u posuvů 1 mm a $1,2\text{ mm}$. Maximální drsnost u těchto posuvů dosahovala velikosti $23,39\text{ }\mu\text{m}$. Mikrogeometrie posuvu $0,6\text{ mm}$, $0,8\text{ mm}$ vykazuje opačný průběh drsnosti obrobené plochy u posuvů 1 mm a $1,2\text{ mm}$. Drnosta dosahuje hodnot v intervalu $Ra <3,444;23,39>\text{ }\mu\text{m}$ a $Rz <18,502;105,33>\text{ }\mu\text{m}$. Mikrogeometrie je vhodná a dostačující pouze pro hrubovací operace.

Shrnutí získaných poznatků z měření výsledné síly soustružení a jejích složek, mikrogeometrie a rozptylu hodnot sil na materiálu 1.4404 s aplikací technologie soustružení se zpětným posuvem za použití VBD typu B s označením *CP-B1108-L4 1115* bez procesního média. Soustružení materiálu 1.4404 klade vysoké nároky na celou řeznou soustavu – obráběcí centrum, měřicí techniku, nástroj, obrobek. Dle předpokladů výsledná síla soustružení se stupňuje s aplikací vyššího posuvu. Měření č. 35 s naměřenými silovými složkami nelze považovat za relevantní z důvodu destrukce snímače dynamometru.

5.3.1 Charakteristické třísky soustružení mat. 1.1191

Během celého procesu soustružení vznikaly navzájem velmi podobné třísky a vykazovaly stejné vlastnosti u materiálu 1.1191, viz. kapitola 5.2.1. Jedná se o drobné třísky, které odcházely po čele VBD a lámaly se o obrobek. Z hlediska bezpečnosti a objemu se jedná o výhodnou a příznivou třísku.

6. Závěr

Vyměnitelná břitová destička *CP-B1108-M5 2025* při soustružení materiálu 1.1191 s přítomností procesního média vykazovala hlavní opotřebení na špičce *VBD* ve formě plastické deformace způsobené při náběhu soustružení, kdy docházelo k vtlačování břitu do povrchu obráběného materiálu. Sekundární výrazně menší opotřebení vznikalo v místě namáhání břitu ve formě plastické deformace, která zapříčinila geometrickou a rozměrovou změnu. Plastická deformace břitu je způsobená vysokou teplotou a tlakem na ostří nástroje. Toto opotřebení způsobuje ještě vyšší zvětšení teploty a může velmi rychle překonat kritické stádium. Ke snížení náchylnosti nástroje k plastické deformaci by bylo vhodné upravit fázi vnikání břitu do obrobku a stanovit maximální řezné parametry k zamezení vzniku jakýchkoliv plastických deformací v oblasti namáhání hlavního břitu.

Řezný nástroj *CP-B1108-L4 1115* při soustružení materiálu 1.1191 bez přítomnosti procesního média vykazoval opotřebení *VBD* na řezném břitu pouze v podobě zabarvení materiálu nástroje. Primární opotřebení bylo žlábkovitého tvaru na čele nástroje v oblasti utvařeče třísky. K omezení tohoto opotřebení by bylo vhodné v řezném procesu využít procesního média, které sníží teplotu v řezném procesu a tím pádem omezí difúzní a abrazivní opotřebení nástroje. Silová analýza prokázala, že významný vliv na výslednou sílu soustružení má posuv, kdy dochází k odstupňování sil. Velikost řezné síly je přímo úměrná na velikost výsledné síly soustružení. Byly určeny dvě kombinace řezných parametrů, které vykazovaly nejvhodnější vlastnosti při soustružení s očekávanou nejvyšší možnou produktivitou v praktickém uplatnění, jednalo se o měření č. 3 a 8.

Obráběný materiál 1.4404 působil na nástroj vyšším odporem, což způsobuje vyšší nároky na celou řeznou soustavu. Z tohoto důvodu musel být upraven interval řezné rychlosti. Naměřené hodnoty řezné složky jsou $\langle 1986,6; 4877,2 \rangle$ N, pasivní složky $\langle 872,1; 2470,9 \rangle$ N a posuvové složky $\langle 244,7; 1091,2 \rangle$ N. Nejvhodnější řezné parametry s ohledem na opotřebení *VBD* a produktivitu je měření č. 25 s řeznými parametry $a_p = 2$ mm, $f = 0,8$ mm, $v_c = 110$ m·min⁻¹. Měření vykazovalo rovnoměrné namáhání ve všech složkách výsledné síly soustružení.

Další vývoj a výzkum technologie soustružení se zpětným posuvem by mohl být zaměřen na řeznou fázi 1 – náběh *VBD* do obrobku, silovou analýzu s přítomností procesního média, popřípadě určení trvanlivosti *VBD* s konstantní a proměnlivou hloubkou řezu.

7. Použitá literatura

- [1] *Blaser Swisslube CZ, s.r.o.* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://www.blaser.com/cs_CZ
- [2] *CitacePro* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>
- [3] *CoroTurn® Prime: Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/Pages/default.aspx
- [4] *CoroTurn® Prime: Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/campaigns/primeturning/Pages/default.aspx?internal_camplink=primeturning&internal_camplink_type=news
- [5] *CoroTurn® Prime: Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-1040-191.pdf>
- [6] *CoroTurn® Prime: Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/handlinginstructions/cs-cz/coroturn-prime-92045.pdf>
- [7] *ČSN ISO 690-2(01 0197) Informace a dokumentace - Bibliografické citace*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [8] *DMG MORI* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://us.dmgmori.com/products/machines/turning/universal-turning/nlx/nlx-2500>
- [9] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody - sylabus* [online]. Brno, 2003 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp_metody_he2.pdf. Fakulta strojního inženýrství VUT - Brno.
- [10] *INTRACO MICRO, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.intracomicro.cz/>
- [11] *Kistler Eastern Europe s.r.o.* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/>

- [12] ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou – Označování skupin a podskupin použití*. 4. vyd. Praha: Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [13] FÜRBAACHER, Ivan, Ivan FÜRBAACHER, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: aktuální stav listopad - včetně 1. aktualizace* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1998 [cit. 2019-04-24]. ISBN 8086229025.
- [14] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0195142063.
- [15] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. New York: Marcel Dekker, c1997. ISBN 0824795792.
- [16] *Mitutoyo Europe GmbH* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1292249246959/Surface%20Roughness%20Measuring%20Instrument/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/1292249246959/Surface%20Roughness%20Measuring%20Instrument/$catalogue/mitutoyoData/PR/178-560-01D/index.xhtml)
- [17] *M. Woite GmbH* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.woite-edelstahl.com/14404en.html>
- [18] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2019-04-17]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [19] BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 9788024835228.
- [20] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 9197229946.
- [21] *Sandvick Coromant* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/pages/default.aspx>
- [22] PAGÁČ, Marek. *Živé ukázky obrábění sledovaly průběh řezných sil* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil/>

- [23] *CoroTurn® Prime: Sandvik coromant* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://sandvik.ecbook.se/se/cs/turning_tools_2017/
- [24] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [25] JHORVÁTH, Evžen. *Povlakování a životnost nástroje* [online]. 2010, (12), 18 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-a-zivotnost-nastroje.html>

8. Seznam příloh

Příloha A: CD médium – diplomová práce a přílohy v elektronické podobě

Příloha B: Snímky VBD [CD]

Příloha C: Soubor vyhodnocující řeznou sílu [CD]

Diplomová/Disertační práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.